



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TE 141599

**STUDI PERENCANAAN FILTER HYBRID UNTUK
MENGURANGI HARMONISA PADA PROYEK PAKISTAN DEEP
WATER CONTAINER PORT**

Rahman Efandi
NRP 2211 100 022

Dosen Pembimbing
Dr. Ir. Margo Pujiانتara, MT.
Ir. R. Wahyudi

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2015



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT - TE 141599

**HYBRID FILTER PLANNING STUDY FOR REDUCING
HARMONIC IN PAKISTAN DEEP WATER CONTAINER PORT
PROJECT**

Rahman Efandi
NRP 2211 100 022

Advisor
Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.
Ir. R. Wahyudi

DEPARTEMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2015

**STUDI PERENCANAAN FILTER HYBRID UNTUK
MENGURANGI HARMONISA PADA PROYEK
PAKISTAN DEEP WATER CONTAINER PORT**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada**

**Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Jurusan Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Menyetujui:

Dosen Pembimbing I,

Dosen Pembimbing II,

Dr. Ir. Margo Pujiastara, MT.
Nip. 196603181990101001

Ir. R. Wahyudi
Nip. 195102021976031003



STUDI PERENCANAAN FILTER HYBRID UNTUK MENGURANGI HARMONISA PADA PROYEK PAKISTAN DEEP WATER CONTAINER PORT

Nama : Rahman Efandi
NRP : 2211 100 022
Pembimbing I : Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.
Pembimbing II : Ir. R. Wahyudi

ABSTRAK

Pakistan Deep Water Container Port merupakan proyek pembangunan pelabuhan peti kemas yang berada di kota Karachi, Pakistan. Sebagai salah satu pelabuhan terbesar di Pakistan, Pakistan Deep Water Container Port harus memiliki target dalam jumlah proses bongkar-muat kapal-kapal kargo, baik dalam skala lokal maupun internasional per-harinya. Oleh karena itu diperlukan motor-motor untuk melakukan hal tersebut. Salah satu cara untuk mengoperasikan motor agar dapat bekerja maksimal dan efisien adalah dengan mengatur kecepatan putar motor menggunakan VFD (*Variable Frequency Drive*). Namun, dalam penggunaan VFD yang didalamnya terdapat komponen non linier, hal ini dapat menimbulkan masalah harmonisa, dimana frekuensi yang dihasilkan akan berpengaruh terhadap kualitas daya pada sistem kelistrikan yang ada serta dapat menimbulkan kerusakan pada peralatan, seperti: trafo dan kabel. Untuk mencegah hal tersebut perlu dilakukan studi perencanaan pemasangan filter untuk meredam frekuensi harmonisa yang timbul. Pada tugas akhir ini akan dirancang sebuah filter *hybrid* untuk mengurangi harmonisa yang timbul akibat adanya beban motor yang terpasang pada Pakistan Deep Water Container Port. Disini juga dilakukan studi berbagai kasus untuk mendapatkan hasil terbaik termasuk dalam penempatan filter pasif dan aktif, sehingga diperoleh keadaan yang maksimal dalam meredam harmonisa. Untuk pemodelan filter aktif dilakukan pada *software* Powersim sedangkan filter pasif dan filter *hybrid* dilakukan pada *software* ETAP 11.0.0.

Kata Kunci : filter aktif, filter *hybrid*, filter pasif, harmonisa

STUDI PERENCANAAN FILTER HYBRID UNTUK MENGURANGI HARMONISA PADA PROYEK PAKISTAN DEEP WATER CONTAINER PORT

Nama : Rahman Efandi
NRP : 2211 100 022
Pembimbing I : Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.
Pembimbing II : Ir. R. Wahyudi

ABSTRAK

Pakistan Deep Water Container Port merupakan proyek pembangunan pelabuhan peti kemas yang berada di kota Karachi, Pakistan. Sebagai salah satu pelabuhan terbesar di Pakistan, Pakistan Deep Water Container Port harus memiliki target dalam jumlah proses bongkar-muat kapal-kapal kargo, baik dalam skala lokal maupun internasional per-harinya. Oleh karena itu diperlukan motor-motor untuk melakukan hal tersebut. Salah satu cara untuk mengoperasikan motor agar dapat bekerja maksimal dan efisien adalah dengan mengatur kecepatan putar motor menggunakan VFD (*Variable Frequency Drive*). Namun, dalam penggunaan VFD yang didalamnya terdapat komponen non linier, hal ini dapat menimbulkan masalah harmonisa, dimana frekuensi yang dihasilkan akan berpengaruh terhadap kualitas daya pada sistem kelistrikan yang ada serta dapat menimbulkan kerusakan pada peralatan, seperti: trafo dan kabel. Untuk mencegah hal tersebut perlu dilakukan studi perencanaan pemasangan filter untuk meredam frekuensi harmonisa yang timbul. Pada tugas akhir ini akan dirancang sebuah filter *hybrid* untuk mengurangi harmonisa yang timbul akibat adanya beban motor yang terpasang pada Pakistan Deep Water Container Port. Disini juga dilakukan studi berbagai kasus untuk mendapatkan hasil terbaik termasuk dalam penempatan filter pasif dan aktif, sehingga diperoleh keadaan yang maksimal dalam meredam harmonisa. Untuk pemodelan filter aktif dilakukan pada *software* Powersim sedangkan filter pasif dan filter *hybrid* dilakukan pada *software* ETAP 11.0.0.

Kata Kunci : filter aktif, filter *hybrid*, filter pasif, harmonisa

Halaman ini sengaja dikosongkan

HYBRID FILTER PLANNING STUDY FOR REDUCING HARMONIC IN PAKISTAN DEEP WATER CONTAINER PORT PROJECT

Name : Rahman Efandi
NRP : 2211 100 022
Advisor I : Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.
Advisor II : Ir. R. Wahyudi

ABSTRACT

Pakistan Deep Water Container Port is a project construction of a container port in the city of Karachi, Pakistan. As one of the largest ports in Pakistan, Pakistan Deep Water Container Port must have a number of targets in the process of loading and unloading cargo ships, both in local and international scale per-day. Therefore necessary motors for doing it. One way to operate the motor in order to work optimally and efficiently by adjusting the motor speed using a VFD (Variable Frequency Drive). However, the use of VFD in which there are non linear components, this can cause problems harmonics, which the frequency of the generated power will affect the quality of the existing electrical system and can cause damage to the equipment, such as: transformers and cables. To prevent that necessary to study planning the installation of filters to muffle frequency harmonics that arise. In this final project will be designed a hybrid filter to reduce harmonics caused by the presence of motor load mounted on Pakistan Deep Water Container Port. Here also conducted studies of various cases to get the best results in the placement of the filter including passive and active, in order to obtain maximum circumstances in reducing harmonics. For the active filter modeling on software Powersim whereas passive filters and filter hybrid performed on software ETAP 11.0.0.

Keywords: active filter, harmonics, hybrid filter, passive filter

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah Robbil 'Alamin, terucap syukur kehadiran Allah atas limpahan rahmat dan karunia yang tak terkira berupa kekuatan, kesabaran, dan kelancaran sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini. Adapun tujuan dari penyusunan tugas akhir ini adalah untuk menyelesaikan salah satu persyaratan mendapatkan gelar sarjana teknik pada bidang studi Teknik Sistem Tenaga, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Dalam kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang banyak berjasa terutama dalam penyusunan tugas akhir ini, yaitu :

1. Segenap keluarga, terutama Ibu dan Bapak serta Kakak tercinta yang selalu memberikan dukungan, semangat, dan doa untuk keberhasilan penulis.
2. Bapak Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT dan Bapak Ir. R. Wahyudi selaku dosen pembimbing yang telah banyak memberikan saran serta bimbingannya.
3. Seluruh rekan E-51 atas kebersamaan dan kerjasamanya selama 4 tahun ini.
4. Seluruh rekan UPT Grha atas dukungan, semangat, bantuan, kebersamaan, dan kerjasama selama ini.
5. Seluruh keluarga besar Teknik Elektro ITS, para dosen, karyawan, mahasiswa, serta rekan-rekan HIMATEKTRO atas dukungan, masukan, dan kerjasamanya selama masa kuliah dan proses pengerjaan tugas akhir.

Besar harapan penulis agar tugas akhir ini dapat memberikan manfaat dan masukan bagi banyak pihak. Oleh karena itu penulis mengharapkan kritik, koreksi, dan saran dari pembaca yang bersifat membangun untuk pengembangan ke arah yang lebih baik.

Surabaya, Juni 2015

Penulis

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

	HALAMAN
JUDUL	
LEMBAR PERNYATAAN	
LEMBAR PENGESAHAN	
ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xv

BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang	1
1.2 Permasalahan	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Batasan Masalah	2
1.5 Metodologi	2
1.6 Sistematika	3
1.7 Relevansi dan Manfaat	4

BAB 2 KONSEP DAYA, HARMONISA DAN FILTER HARMONISA

2.1 Konsep Daya	5
2.1.1 Permasalahan Faktor Daya	7
2.1.2 Perbaikan Faktor Daya	8
2.2 Harmonisa	9
2.2.1 Metode Fourier Perhitungan Harmonisa	10
2.2.2 <i>Total Harmonic Distortion</i> (THD)	12
2.2.3 <i>Total Demand Distortion</i> (TDD)	13
2.2.4 Sumber-sumber Harmonisa	13
2.2.4.1 Konverter	13
2.2.4.2 Tanur Busur Listrik	14
2.2.4.3 Transformator	14
2.2.4.4 Mesin-Mesin Berputar	16
2.2.5 Pengaruh yang Ditimbulkan oleh Harmonisa	16
2.2.5.1 Rugi-Rugi pada Saluran Transmisi dan Kabel	17

2.2.5.2	Pengaruh Pada Faktor Daya.....	17
2.2.5.3	Pengaruh Terhadap Sistem Proteksi	18
2.2.5.4	Pengaruh pada Mesin-Mesin Berputar.....	18
2.2.5.5	Pengaruh Terhadap Transformator	20
2.3	Filter Harmonisa	20
2.3.1	Filter Pasif.....	21
2.3.2	Filter Aktif.....	21
2.3.2.1	Kontrol PI	23
2.3.2.2	<i>Pulse Widht Modulation</i> (PWM)	23
2.3.2.3	Inverter Tiga Fasa	24

BAB 3 SISTEM KELISTRIKAN PROYEK PAKISTAN DEEP WATER CONTAINER PORT

3.1	Sistem kelistrikan Pakistan Deep Water Container Port.....	25
3.2	Pembangkitan dan Pembebanan Proyek Pakistan Deep Water Container port.....	26
3.3	Sistem Distribusi pada Proyek Pakistan Deep Water Container Port.....	27
3.3.1	<i>Composite Network SS-I</i>	27
3.3.2	<i>Composite Network MCC-CP-006</i>	28
3.4	Sumber Harmonisa pada Proyek Pakistan Deep Water Container Port.....	30
3.5	Langkah-langkah Peredaman Harmonisa pada Proyek Pakistan Deep Water Container Port.....	31

BAB 4 SIMULASI DAN ANALISIS

4.1	Simulasi Aliran Daya pada Sistem Kelistrikan Proyek Pakistan Deep Water Container Port.....	34
4.2	Simulasi Harmonisa pada Sistem Kelistrikan Proyek Pakistan Deep Water Container Port.....	35
4.2.1	Distorsi Harmonisa Terhadap Tegangan	40
4.2.1.1	Harmonisa Tegangan pada Network SS-6	41
4.2.1.2	Harmonisa Tegangan pada Network SS-7	42
4.2.2	Distorsi Harmonisa Terhadap Arus	44
4.2.2.1	Harmonisa Arus pada Network SS-6	45
4.2.2.2	Harmonisa Arus pada Network SS-7	46
4.3	Pemasangan dan Perhitungan Spesifikasi Filter Pasif	47
4.3.1	Perhitungan dan Pemasangan Filter Pasif Orde 5 pada Network SS-6.....	48

4.3.2	Perhitungan dan Pemasangan Filter Pasif Orde 7 pada Network SS-6.....	51
4.3.3	Perhitungan dan Pemasangan Filter Pasif Orde 11 pada Network SS-6.....	54
4.3.4	Perhitungan dan Pemasangan Filter Pasif Orde 17 pada Network SS-6.....	57
4.3.5	Perhitungan dan Pemasangan Filter Pasif Orde 23 pada Network SS-6.....	60
4.3.6	Perhitungan dan Pemasangan Filter Pasif Orde 5 pada Network SS-7.....	63
4.3.7	Perhitungan dan Pemasangan Filter Pasif Orde 7 pada Network SS-7.....	66
4.3.8	Perhitungan dan Pemasangan Filter Pasif Orde 11 pada Network SS-7.....	69
4.3.9	Perhitungan dan Pemasangan Filter Pasif Orde 17 pada Network SS-7.....	72
4.3.10	Perhitungan dan Pemasangan Filter Pasif Orde 23 pada Network SS-7.....	75
4.4	Pemasangan dan Perhitungan Spesifikasi Filter Pasif.....	78
4.4.1	Rangkaian Filter Aktif pada Psim.....	79
4.4.1	Simulasi dan Pemasangan Filter Aktif.....	80
4.4.1.1	Konversi Data Karakteristik VFD dari ETAP ke Psim.....	80
4.4.1.2	Hasil Simulasi Filter Aktif pada Psim.....	81
4.4.1.3	Konversi Data VFD Baru dari Psim ke ETAP.....	82
4.4.1.4	Hasil Simulasi Filter Hybrid pada ETAP.....	83
4.5	Perbandingan Setelah Pemasangan Filter Hybrid.....	86

BAB 5 PENUTUP

5.1	Kesimpulan.....	91
5.2	Saran.....	92

DAFTAR PUSTAKA	93
RIWAYAT HIDUP PENULIS	95

Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

DAFTAR TABEL

	HALAMAN
Tabel 2.1 Batas distorsi harmonisa untuk sistem distribusi 120 V sampai 69 kV berdasarkan IEEE Std 519-1992.....	12
Tabel 2.2 Batas distorsi tegangan berdasarkan IEEE Std 519-1992.....	13
Tabel 3.1 Data Kapasitas Pembangkit.....	26
Tabel 3.2 Data Kapasitas Pembangkit.....	26
Tabel 3.3 Data Transformator Distribusi pada Proyek Pakistan Deep Water Container Port.....	28
Tabel 3.4 Data Beban Motor 11 kV pada Proyek Pakistan Deep Water Container Port.....	29
Tabel 3.5 Data VFD pada Motor Sebagai Penghasil Harmonik	30
Tabel 4.1 Data Hasil Simulasi Aliran Daya pada Bus Generator	34
Tabel 4.2 Data Hasil Simulasi Aliran Daya pada Bus Penyulang Utama (<i>Main Bus</i>)	34
Tabel 4.3 Data Hasil Simulasi Aliran Daya pada <i>Network</i> SS-6 dan SS-7 (Bus Harmonisa)	34
Tabel 4.4 Data Hasil Simulasi Harmonisa Tanpa Filter	37
Tabel 4.5 Batas Nilai Harmonisa Tegangan Sesuai IEEE STD 519-1992.....	40
Tabel 4.6 Persentase Harmonisa Terhadap Tegangan Fundamental di Orde Tertentu pada bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS6-01B.....	41
Tabel 4.7 Persentase Harmonisa Terhadap Tegangan Fundamental di Orde Tertentu pada bus HSB-SS7-01A dan HSB-SS7-01B.....	42
Tabel 4.8 Batas Nilai Harmonisa Arus Sesuai IEEE STD 519-1992.....	44
Tabel 4.9 Persentase Harmonisa Terhadap Arus Fundamental Orde Tertentu pada cable 11.....	45
Tabel 4.10 Persentase Harmonisa Terhadap Arus Fundamental Orde Tertentu pada cable 22.....	46
Tabel 4.11 Persentase Harmonisa Terhadap Tegangan Fundamental pada Orde Tertentu Setelah Pemasangan Filter Orde 5	49
Tabel 4.12 Persentase Harmonisa Terhadap Arus Fundamental pada Orde Tertentu Setelah Pemasangan Filter Orde 5	49

Tabel 4.13	Persentase Harmonisa Terhadap Tegangan Fundamental pada Orde Tertentu Setelah Pemasangan Filter Orde 7.....	51
Tabel 4.14	Persentase Harmonisa Terhadap Arus Fundamental pada Orde Tertentu Setelah Pemasangan Filter Orde 7 ...	52
Tabel 4.15	Persentase Harmonisa Terhadap Tegangan Fundamental pada Orde Tertentu Setelah Pemasangan Filter Orde 11.....	54
Tabel 4.16	Persentase Harmonisa Terhadap Arus Fundamental pada Orde Tertentu Setelah Pemasangan Filter Orde 11 .	55
Tabel 4.17	Persentase Harmonisa Terhadap Tegangan Fundamental pada Orde Tertentu Setelah Pemasangan Filter Orde 17.....	57
Tabel 4.18	Persentase Harmonisa Terhadap Arus Fundamental pada Orde Tertentu Setelah Pemasangan Filter Orde 17 .	58
Tabel 4.19	Persentase Harmonisa Terhadap Tegangan Fundamental pada Orde Tertentu Setelah Pemasangan Filter Orde 23.....	60
Tabel 4.20	Persentase Harmonisa Terhadap Arus Fundamental pada Orde Tertentu Setelah Pemasangan Filter Orde 23 .	61
Tabel 4.21	Persentase Harmonisa Terhadap Tegangan Fundamental pada Orde Tertentu Setelah Pemasangan Filter Orde 5.....	63
Tabel 4.22	Persentase Harmonisa Terhadap Arus Fundamental pada Orde Tertentu Setelah Pemasangan Filter Orde 5 ...	64
Tabel 4.23	Persentase Harmonisa Terhadap Tegangan Fundamental pada Orde Tertentu Setelah Pemasangan Filter Orde 7.....	66
Tabel 4.24	Persentase Harmonisa Terhadap Arus Fundamental pada Orde Tertentu Setelah Pemasangan Filter Orde 7 ...	67
Tabel 4.25	Persentase Harmonisa Terhadap Tegangan Fundamental pada Orde Tertentu Setelah Pemasangan Filter Orde 11.....	69
Tabel 4.26	Persentase Harmonisa Terhadap Arus Fundamental pada Orde Tertentu Setelah Pemasangan Filter Orde 11 .	70
Tabel 4.27	Persentase Harmonisa Terhadap Tegangan Fundamental pada Orde Tertentu Setelah Pemasangan Filter Orde 17.....	72

Tabel 4.28	Persentase Harmonisa Terhadap Arus Fundamental pada Orde Tertentu Setelah Pemasangan Filter Orde 17..	73
Tabel 4.29	Persentase Harmonisa Terhadap Tegangan Fundamental pada Orde Tertentu Setelah Pemasangan Filter Orde 23	75
Tabel 4.30	Persentase Harmonisa Terhadap Arus Fundamental pada Orde Tertentu Setelah Pemasangan Filter Orde 23..	76
Tabel 4.31	Data Beban <i>Non Linier</i> (kiri) dan Parameter Filter Aktif (kanan).....	79
Tabel 4.32	Hasil Persentase Harmonisa Sebelum dan Setelah Simulasi Filter Aktif.....	82
Tabel 4.33	Persentase Harmonisa Terhadap Tegangan Fundamental pada Orde Tertentu Setelah Pemasangan Filter hybrid.....	83
Tabel 4.34	Persentase Harmonisa Terhadap Arus Fundamental pada Orde Tertentu Setelah Pemasangan Filter <i>hybrid</i>	84
Tabel 4.35	Perbandingan antara menggunakan filter pasif dan filter <i>hybrid</i>	86
Tabel 4.36	Data Hasil Simulasi Aliran Daya pada Bus Generator Setelah pemasangan filter <i>Hybrid</i>	86
Tabel 4.37	Data Hasil Simulasi Aliran Daya pada <i>Network</i> SS-6 dan SS-7 (Bus Harmonisa) Setelah pemasangan filter Hybrid.....	86
Tabel 4.28	Data Hasil Simulasi Aliran Daya pada <i>Network</i> SS-6 dan SS-7 (Bus Harmonisa) Setelah pemasangan filter Hybrid.....	86
Tabel 4.29	Data Hasil Simulasi Harmonisa Setelah Pemasangan Filter <i>Hybrid</i>	87

Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

	HALAMAN
Gambar 2.1	Segitiga Daya 6
Gambar 2.2	Diagram Fasor Daya 8
Gambar 2.3	Gelombang Sinusoidal Arus dan Tegangan 9
Gambar 2.4	Gelombang Fundamental 9
Gambar 2.5	Gelombang Harmonik Ketiga 10
Gambar 2.6	Gelombang Hasil Penjumlahan Fundamental dan Harmonik 10
Gambar 2.7	Magnetisasi Transformator (tanpa histerisis) meliputi: Kurva Magnetisasi, Bentuk Gelombang Fluks dan Arus Magnetisasi 15
Gambar 2.8	Rangkaian ekivalen Motor Induksi Untuk Harmonik Ke-n 19
Gambar 2.9	Berbagai tipe Rangkaian Filter Pasif..... 21
Gambar 2.10	Rangkaian Filter Aktif 22
Gambar 3.1	<i>Single Line Diagram</i> Sistem Kelistrikan Utama Proyek Pakistan Deep Water Container Port 25
Gambar 3.2	<i>Flowchart</i> Pengerjaan Tugas Akhir 32
Gambar 4.1	Simulasi Harmonisa pada <i>Network</i> SS-6 35
Gambar 4.2	Simulasi Harmonisa pada <i>Network</i> SS-7 36
Gambar 4.3	Diagram Harmonisa Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS6-01B 41
Gambar 4.4	Gelombang Harmonisa Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS6-01B..... 42
Gambar 4.5	Diagram Harmonisa Tegangan pada Bus HSB-SS7-01A dan HSB-SS7-01B 43
Gambar 4.6	Gelombang Harmonisa Tegangan pada Bus HSB-SS7-01A dan HSB-SS7-01B..... 43
Gambar 4.7	Diagram Harmonisa Arus pada Bus Cable 11..... 45
Gambar 4.8	Gelombang Harmonisa Arus pada Bus Cable 11..... 46
Gambar 4.9	Diagram Harmonisa Arus pada Bus Cable 22..... 47
Gambar 4.10	Gelombang Harmonisa Arus pada Bus Cable 22..... 47
Gambar 4.11	Diagram Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 5..... 49
Gambar 4.12	Gelombang Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 5..... 50

Gambar 4.13	Diagram Arus pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 5.....	50
Gambar 4.14	Gelombang Arus pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 5	50
Gambar 4.15	Diagram Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 7	52
Gambar 4.16	Gelombang Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 7	53
Gambar 4.17	Gelombang Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 7	53
Gambar 4.18	Gelombang Arus pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 7	53
Gambar 4.19	Diagram Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 11 ...	56
Gambar 4.20	Gelombang Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 11 ...	56
Gambar 4.21	Gelombang Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 11 ...	56
Gambar 4.22	Gelombang Arus pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 11 ...	56
Gambar 4.23	Diagram Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 17 ...	58
Gambar 4.24	Gelombang Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 17. ...	59
Gambar 4.25	Gelombang Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 17 ...	59
Gambar 4.26	Gelombang Arus pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 17 ..	59
Gambar 4.27	Diagram Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 23. ...	61
Gambar 4.28	Gelombang Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 23. ...	62
Gambar 4.29	Gelombang Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 23 ...	62
Gambar 4.30	Gelombang Arus pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 23 ..	62
Gambar 4.31	Diagram Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 5	64

Gambar 4.32	Gelombang Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 5.....	65
Gambar 4.33	Diagram Arus pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 5.....	65
Gambar 4.34	Gelombang Arus pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 5.....	65
Gambar 4.35	Diagram Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 7.....	67
Gambar 4.36	Gelombang Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 7.....	68
Gambar 4.37	Gelombang Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 7.....	68
Gambar 4.38	Gelombang Arus pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 7.....	68
Gambar 4.39	Diagram Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 11	70
Gambar 4.40	Gelombang Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 11	71
Gambar 4.41	Gelombang Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 11	71
Gambar 4.42	Gelombang Arus pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 11	71
Gambar 4.43	Diagram Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 17....	73
Gambar 4.44	Gelombang Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 17....	74
Gambar 4.45	Gelombang Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 17....	74
Gambar 4.46	Gelombang Arus pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 17...	74
Gambar 4.47	Diagram Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 23....	76
Gambar 4.48	Gelombang Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 23....	77
Gambar 4.49	Gelombang Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 23....	77
Gambar 4.50	Gelombang Arus pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 23...	77
Gambar 4.51	Pemodelan Rangkaian Filter Aktif pada Psim.	79

Gambar 4.52	Konversi Data Karakteristik VFD dari ETAP ke Psim	80
Gambar 4.53	Bentuk Gelombang dan Diagram Karakteristik VFD yang terdapat pada ETAP	81
Gambar 4.54	Bentuk Gelombang Karakteristik VFD yang terdapat pada Psim.....	81
Gambar 4.55	Bentuk Gelombang Setelah Running Simulasi	81
Gambar 4.56	Konversi Data Magnitude VFD baru dari Psim ke ETAP.	83
Gambar 4.57	Diagram Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter <i>hybrid</i>	84
Gambar 4.58	Gelombang Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter <i>hybrid</i>	84
Gambar 4.59	Diagram Arus pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter <i>hybrid</i>	85
Gambar 4.60	Gelombang Arus pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter <i>hybrid</i>	85

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Penggunaan beban non linier akhir-akhir ini semakin meningkat mulai dari peralatan rumah tangga hingga industri. Idealnya, gelombang arus bolak-balik murni adalah berbentuk sinusoidal. Namun dengan adanya pembebanan non linier bentuk gelombang tersebut terdistorsi sehingga tidak berbentuk sinusoidal lagi. Beban non linier tersebut menjadi sumber distorsi yang dapat merusak gelombang fundamental yang ada. Fenomena tersebut sering disebut dengan harmonisa. Pada sistem tenaga listrik, terjadinya fenomena harmonisa merupakan hal yang merugikan karena dapat mengakibatkan rusaknya peralatan yang ada, seperti : transformator dan kabel. Beban non linier yang dapat menimbulkan harmonisa antara lain : *Variable Frequency Drive* (VFD), *Uninterruptible Power Supply* (UPS), lampu *fluorescent*, *Charger* baterai, komputer dan berbagai macam konverter.

Pakistan Deep Water Container Port merupakan salah satu pelabuhan terbesar di Pakistan. Pelabuhan ini cukup aktif melayani bongkar-muat peti kemas sehari-harinya, baik domestik maupun internasional. Diperlukan kontinuitas yang tinggi dalam unit ini, maka dari itu dibutuhkan VFD untuk mengatur kecepatan motor yang disesuaikan oleh jumlah proses bongkar-muat yang diinginkan. VFD merupakan salah satu sumber harmonisa. VFD digunakan pada saat *starting* motor dengan tujuan untuk memperkecil arus *starting* yang dihasilkan oleh motor tersebut. Berdasarkan data yang diambil pada plant tersebut, didapat distorsi harmonisa sebesar 20.7% padahal batas nilai distorsi harmonisa yang diijinkan menurut standar IEEE 519-1992 adalah sebesar 5%. Sehingga diperlukan pemasangan filter untuk meredam harmonisa tersebut.

Pada umumnya jenis filter yang digunakan untuk mengurangi harmonisa adalah jenis filter pasif dikarenakan harganya yang relatif murah. Namun pada beberapa kondisi, penggunaan filter pasif belum cukup untuk mengurangi distorsi harmonisa yang ada. Oleh karena itu, pada tugas akhir ini difokuskan pada pemodelan filter pasif dan filter aktif atau sering disebut dengan filter *hybrid* untuk mengurangi harmonisa yang terjadi pada Proyek Pakistan Deep Water Container Port.

1.2 Permasalahan

Permasalahan yang dibahas dalam tugas akhir ini adalah bagaimana mengurangi harmonisa yang terjadi pada Proyek Pakistan Deep Water Container Port yang disebabkan oleh penggunaan beban non linier berupa *Variable Frequency Drive* (VFD) pada bus tertentu dengan pemasangan filter *hybrid*, sehingga didapat nilai distorsi harmonisa yang sesuai dengan standar IEEE 519-1992.

1.3 Tujuan

Tugas Akhir ini memiliki tujuan untuk melaksanakan studi mengenai harmonisa dan perencanaan filter yang sesuai untuk diterapkan pada Proyek Pakistan Deep Water Container Port. Dengan pemasangan filter tersebut, diharapkan dapat meredam frekuensi harmonisa yang terjadi dan mampu meningkatkan kualitas daya serta kinerja sistem pada *plant* tersebut.

1.4 Batasan Masalah

Pada pengerjaan tugas akhir ini terdapat batasan masalah agar tidak menyimpang dari ketentuan yang telah dibuat, antara lain :

1. Pemodelan dan simulasi sistem kelistrikan Proyek Pakistan Deep Water Container Port menggunakan *software* ETAP 11.0.
2. Analisa pemodelan dan simulasi harmonisa dilakukan pada kondisi normal (*steady state*).
3. Peredaman harmonisa dengan filter pasif menggunakan *software* ETAP 11.0.
4. Pemodelan kinerja dari filter aktif menggunakan *software* Powersim.

1.5 Metodologi

Metode yang digunakan untuk penyelesaian kasus dalam tugas akhir ini diawali dengan pengumpulan dan melengkapi data *single line diagram* (SLD), *datasheet* peralatan, dan referensi-referensi ilmiah. Data-data yang terkumpul ini selanjutnya memasuki tahap pemodelan sistem menggunakan *software* ETAP 11.0. Pemodelan ini menganalisis aliran daya dan harmonisa yang terjadi pada sistem kelistrikan di Proyek Pakistan Deep Water Container Port. Dari analisis aliran daya dilihat kondisi faktor daya sistem kelistrikannya, terutama pada bagian *main substation*, sedangkan dari analisis harmonisa dilihat besarnya distorsi

harmonisa yang terjadi pada bus-bus yang berdekatan dengan sumber harmonisa berupa VFD, karena pada umumnya darisanalah sumber frekuensi harmonisa terjadi. Dengan analisis tersebut didapatkan orde harmonisa yang dominan terjadi pada bus-bus yang ingin dianalisis, kemudian digunakan untuk mendesain filter pasif sebagai peredaman harmonisa yang terjadi dan mengkompensasi daya reaktif untuk perbaikan faktor daya pada bus-bus tersebut di *main substation*. Setelah perhitungan dan pemodelan dilakukan, akan didapatkan nilai parameter kapasitor (C), induktor (L) dan resistor (R) beserta tipe dari filter pasif yang paling sesuai untuk diterapkan pada *plant* tersebut. Ternyata pemasangan filter pasif belum dapat meredam seluruh sumber harmonisa. Oleh karena itu, perlu penambahan filter aktif pada sistem. Pemodelan filter aktif dilakukan dengan membuat rangkaian filter aktif pada *software* Powersim kemudian dimasukkan parameter sumber harmonisa yang ada, dalam hal ini yang dimasukkan adalah parameter *magnitude* dari VFD. Setelah itu dilihat bagaimana hasil kinerja filter aktif tersebut terhadap distorsi sumber harmonisa. Setelah hasil respon diketahui, kemudian dikonversikan kembali dalam bentuk *Variable Frequency Drive* (VFD) yang baru. VFD baru tersebut merupakan VFD yang telah diberikan filter aktif. VFD baru tersebut selanjutnya dimasukkan kembali ke sumber harmonisa yang ada pada ETAP. Selanjutnya dilakukan simulasi analisis harmonisa dengan menggunakan filter *hybrid* tersebut (filter pasif dan filter aktif) pada ETAP hingga didapatkan hasil yang maksimal dalam peredaman harmonisa.

Dengan menggunakan filter *hybrid* ini diharapkan dapat memperoleh keadaan yang efisien dan maksimal dalam meredam harmonisa agar sesuai dengan standar IEEE 519-1992. Setelah itu tahapan tugas akhir ini dilanjutkan dengan kesimpulan, sehingga perancangan filter *hybrid* ini dapat menjadi rekomendasi untuk diaplikasikan pada Proyek Pakistan Deep Water Container Port.

1.6 Sistematika

Tugas akhir ini disusun dengan sistematika sebagai berikut :

BAB I : Pendahuluan

Dalam bab ini membahas tentang penjelasan mengenai latar belakang, rumusan masalah, tujuan, Batasan masalah, sistematika penulisan, metodologi, sistematika penulisan dan relevansi.

BAB II : Dasar Teori

Dalam bab ini secara garis besar membahas tentang teori penunjang mengenai harmonisa, studi aliran daya dan pemodelan filter *hybrid*.

BAB III : Sistem Kelistrikan Proyek Pakistan Deep Water Container Port

Dalam bab ini membahas tentang pemodelan sistem kelistrikan yang terdapat pada Proyek Pakistan Deep Water Container Port, meliputi : pembangkit, beban, sumber harmonisa dan metodologi peredaman distorsi harmonisa.

BAB IV : Simulasi dan Analisis

Dalam bab ini berisikan tentang hasil analisis dari proses simulasi mengenai peredaman harmonisa menggunakan filter *hybrid* yang telah dilakukan.

BAB V : Penutup

Dalam bab ini berisi tentang kesimpulan dan saran dari pembahasan yang telah dilakukan.

1.7 Relevansi dan Manfaat

Hasil yang diperoleh dari Tugas Akhir ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut :

1. Dapat menjadi bahan rekomendasi untuk diterapkan pada Proyek Pakistan Deep Water Container Port.
2. Dapat meningkatkan penguasaan IPTEK di bidang harmonisa dan peningkatan kualitas daya.
3. Sebagai referensi bagi peneliti atau mahasiswa mengenai studi perancangan filter *hybrid*.

BAB II

FAKTOR DAYA, HARMONISA DAN FILTER HARMONISA

2.1 Konsep Daya

Daya yang diserap oleh suatu beban adalah drop tegangan (Volt) pada beban tersebut dikalikan dengan arus (Ampere) yang mengalir melalui beban tersebut [1]. Studi analisis harmonisa sangat berpengaruh dengan analisis aliran daya. Oleh karena itu, dibutuhkan penjelasan dasar mengenai konsep daya untuk membantu menyelesaikan masalah harmonisa. Pada dasarnya, terdapat dua definisi umum mengenai faktor daya. Pertama faktor daya didefinisikan sebagai *cosinus* dari sudut beda fasa antara tegangan dan arus yang menyatakan arus tertinggal atau mendahului tegangan. Kedua, faktor daya didefinisikan sebagai rasio antara daya aktif dengan daya total, definisi kedua inilah yang pada umumnya lebih sering digunakan di dalam konsep sistem tenaga listrik. Nilai faktor daya bervariasi antara 0 s/d 1. Nilai faktor daya pada umumnya juga dinyatakan pada persen. Untuk lebih jelasnya mengenai faktor daya, Berikut dijelaskan konsep pembagian daya listrik, daya dibagi menjadi tiga, yaitu :

a. Daya Reaktif

Merupakan daya listrik yang dihasilkan oleh beban-beban yang bersifat reaktansi. Terdapat dua jenis beban reaktansi, yaitu reaktansi induktif dan reaktansi kapasitif. Beban – beban akan menyerap daya reaktif untuk menghasilkan medan magnet. Contoh beban listrik induktif adalah transformator. Sedangkan contoh beban listrik kapasitif adalah kapasitor.

b. Daya Aktif

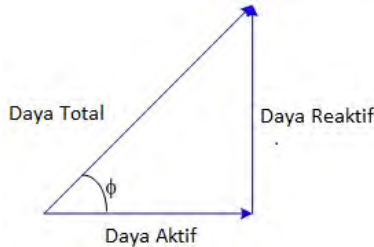
Merupakan daya listrik yang digunakan secara nyata, misalnya untuk menghasilkan panas, cahaya atau putaran pada motor listrik. Daya nyata dihasilkan oleh beban-beban listrik yang bersifat resistif murni. Besarnya daya nyata sebanding dengan kuadrat arus listrik yang mengalir pada beban resistif dan dinyatakan dalam satuan Watt.

c. Daya Total

Daya total merupakan penjumlahan dari daya aktif dan daya reaktif. Satuan dari daya total adalah VA. Daya total disebut juga daya kompleks didapat dari hasil kali antara besarnya tegangan dan arus listrik yang mengalir pada beban.

Hubungan antara ketiga daya tersebut, daya reaktif, daya aktif dan daya total pada suatu tegangan (V) adalah sebanding dengan arus (I) dan dinyatakan sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \text{Daya Total (VA)} &= \sqrt{(\text{Daya Aktif})^2 + (\text{Daya Reaktif})^2} \\ I_t &= \sqrt{(V.I. \cos \varphi)^2 + (V.I. \sin \varphi)^2} \end{aligned} \quad (2.1)$$



Gambar 2.1 Segitiga Daya

Berdasarkan gambar segitiga daya diatas terdapat sudut φ diantara daya total dan daya aktif. Perbandingan sudut itulah yang disebut dengan faktor daya atau $\cos \varphi$. Faktor daya dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \text{Faktor daya} &= \frac{\text{Daya rata-rata}}{(\text{Tegangan rms} \times \text{Arus rms})} \\ &= \frac{\text{Daya aktif}}{\text{Daya total}} = \frac{KW}{KVA} \end{aligned} \quad (2.2)$$

Untuk gelombang dengan bentuk tidak sinusoidal dan terdapat harmonisa pada gelombang tersebut, maka nilai faktor daya akan berbanding lurus dengan bentuk gelombang fundamentalnya. Berikut adalah persamaan nilai sesaat dari tegangan dan arus :

$$V = \sum_1^n \sqrt{2} V_n \sin(n\omega t - \alpha_n) + \sum_1^m \sqrt{2} I_n \sin(n\omega t - \alpha_m) \quad (2.3)$$

$$I = \sum_1^n \sqrt{2} I_n \sin(n\omega t + \alpha_n + \varphi_n) + \sum_1^m \sqrt{2} I_n \sin(n\omega t - \alpha_m) \quad (2.4)$$

Sehingga faktor dayanya adalah :

$$PF = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T v i dt}{V_{rms} I_{rms}} = \frac{\sum_1^n V_n I_n \cos \varphi_n}{\{(\sum_1^n V_n^2 + \sum_1^n V_n^2)(\sum_1^n I_n^2 + \sum_1^p I_p^2)\}^{1/2}} \quad (2.5)$$

Jika bentuk tegangan sinuoidal maka persamaan tersebut dapat disederhanakan menjadi : [2]

$$PF = \frac{V_1 I_1 \cos \phi_1}{V_1 I_{rms}} = \frac{I_1}{I_{rms}} \cos \phi_1 = \mu \cos \phi_1 \quad (2.6)$$

Dimana :

μ = faktor distorsi arus

$\cos \phi_1$ = *displacement factor* antara komponen fundamental dari arus dan tegangan

Nilai faktor daya akan tinggi ketika $\mu = 1$ karena $\cos \phi_1$ tidak dapat lebih besar dari 1. Apabila dilihat dari hubungan diatas terlihat bahwa penyaluran akan sangat baik jika digunakan nilai faktor daya yang bernilai maksimum atau mendekati 1.

Nilai faktor daya dapat bersifat mendahului (*leading*) atau tertinggal (*lagging*). Pada umumnya suatu industri biasanya hanya faktor daya beban yang diperhitungkan. Faktor daya akan bersifat *leading* apabila beban menghasilkan daya reaktif (Var). Apabila arah daya aktif dan reaktif sama maka faktor dayanya bersifat *lagging*. Namun apabila arahnya berlawanan maka faktor dayanya bersifat *leading*.

2.1.1 Permasalahan Faktor Daya

Daya listrik selalu akan mengalir menuju beban, karena itu dalam hal ini aliran daya juga memerlukan aliran beban [3]. Pengoperasian beban-beban listrik seperti : transformator daya, motor induksi dan beban jenis konverter lain akan menarik arus magnetisasi dari jaringan sistem tenaga listrik sehingga mengakibatkan berkurangnya faktor kerja dan membutuhkan daya reaktif yang cukup besar. Hal ini sangat merugikan dikarenakan :

- a. Menurunnya efisiensi peralatan sistem tenaga seperti : transformator daya dan penghantar dikarenakan menurunnya faktor kerja akan menambah besar arus yang melalui peralatan tersebut dan menambah rugi-rugi daya.
- b. Perbedaan tegangan listrik pada kondisi beban ringan dan beban penuh yang relatif besar, hal tersebut berakibat pada pengaturan tegangan menjadi buruk.
- c. Pada instalasi listrik dengan batasan arus dan daya tertentu, akan memerlukan kapasitas yang lebih besar dari kapasitas normal.

2.1.2 Perhitungan Perbaikan Faktor Daya

Untuk menangani permasalahan mengenai faktor daya maka berdasarkan uraian penjelasan mengenai faktor daya diatas, dapat disusun persamaan perbaikan faktor daya yang dapat ditulis sebagai berikut :

$$\cos \varphi = \frac{\text{Daya aktif}}{\text{Daya total}} = \frac{\text{KW}}{\text{KVA}} \quad (2.7)$$

$$\tan \varphi = \frac{\text{Daya reaktif}}{\text{Daya aktif}} = \frac{\text{KVar}}{\text{KW}} \quad (2.8)$$

Karena komponen daya aktif umumnya konstan (komponen KVA dan Kvar berubah sesuai dengan faktor daya), maka dapat ditulis sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \text{Daya reaktif} &= \text{Daya aktif} \times \tan \varphi \\ Q &= (P \times \tan \varphi) \text{ Kvar} \end{aligned} \quad (2.9)$$

Penurunan rumus untuk mencari *rating* yang sesuai dibutuhkan untuk memperbaiki faktor daya beban, Persamaannya adalah sebagai berikut :

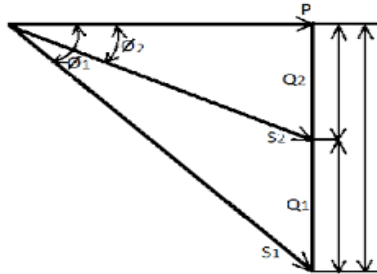
Daya reaktif pada PF awal

$$Q_1 = P_1 \times \tan \varphi_1$$

Daya reaktif pada PF yang diperbaiki

$$Q_2 = P_2 \times \tan \varphi_2 \quad (2.10)$$

Dimana nilai $P_2 = P_1 = \text{daya aktif}$



Gambar 2.2 Diagram Fasor Daya

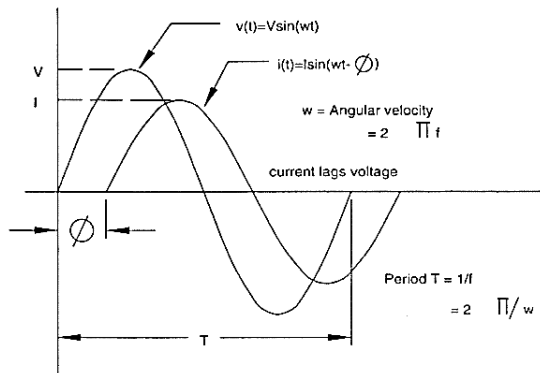
Berdasarkan gambar 2.2 dapat diketahui hubungan antara daya aktif (P) dengan daya reaktif (Q) serta daya total (S). Sehingga perhitungan spesifikasi kapasitor yang diperlukan untuk perbaikan faktor daya adalah sebagai berikut :

$$\text{Daya reaktif } (\Delta Q) = Q_1 - Q_2$$

$$\text{Daya reaktif } (\Delta Q) = P \times (\tan \theta_1 - \tan \theta_2) \quad (2.11)$$

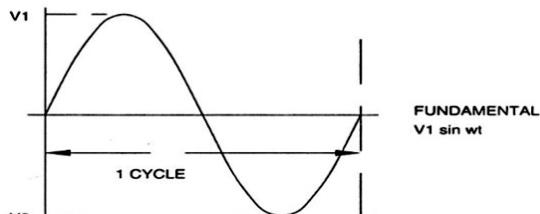
2.2 Harmonisa

Harmonisa pada sistem tenaga listrik dapat dikatakan sebagai cacat gelombang akibat adanya interferensi gelombang lain yang memiliki frekuensi kelipatan bilangan *integer* dari frekuensi fundamentalnya [4]. Hal tersebut terjadi akibat adanya pembebanan non linier pada sistem. Harmonisa dapat menimbulkan kerugian pada sistem tersebut karena terjadi distorsi pada frekuensi fundamental. Akibat terjadinya harmonisa seperti : menurunnya kinerja dari peralatan, terjadi pemanasan pada peralatan secara berlebih dan penurunan kualitas daya pada sistem tersebut. Berikut adalah gambar gelombang arus dan gelombang tegangan.

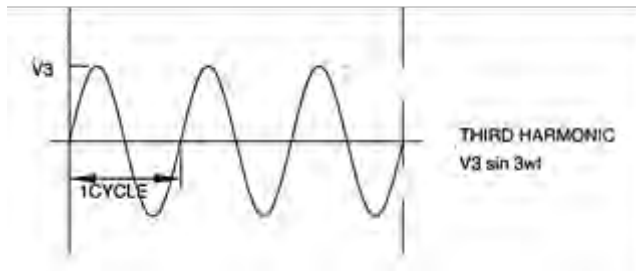


Gambar 2.3 Gelombang Sinusoidal Arus dan Tegangan

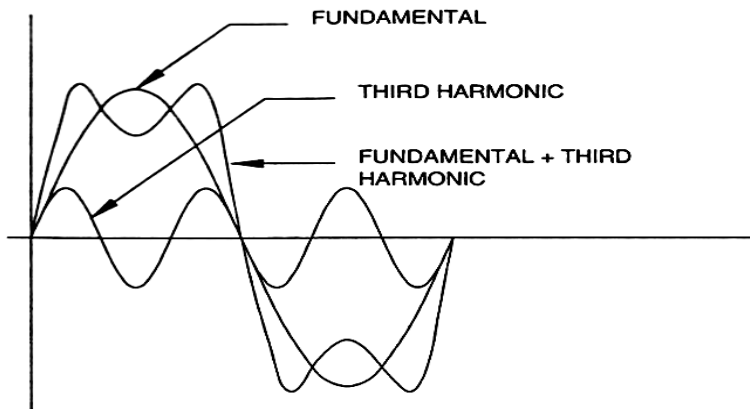
Pengaruh yang ditimbulkan akibat adanya pengoperasian beban harmonik adalah gelombang fundamental yang sebelumnya berbentuk sinusoidal, akan terdistorsi menjadi tidak sinusoidal. Hal ini terjadi akibat adanya penjumlahan dari gelombang sinusoidal fundamental dengan gelombang sinusoidal dari harmonisa yang terjadi. Berikut adalah penjelasan gambar mengenai gelombang harmonik :



Gambar 2.4 Gelombang Fundamental



Gambar 2.5 Gelombang Harmonik Ketiga



Gambar 2.6 Gelombang Hasil Penjumlahan Fundamental dan Harmonik

2.2.1 Metode Fourier Perhitungan Harmonisa

Pada Tahun 1822 J.B.J. Fourier, seorang ahli matematika dan fisika untuk pertama kalinya memperkenalkan teori *Fourier Series* lewat artikelnya yang berjudul "*Analytic Theory of Heat*". Joseph Fourier juga menuliskan bahwa setiap fungsi kontinu berulang dalam interval T dapat diwakili oleh penjumlahan dari DC komponen, komponen sinusoidal fundamental, dan serangkaian komponen sinusoidal orde tinggi (harmonisa) pada frekuensi yang merupakan kelipatan integer dari frekuensi fundamental.

Analisis harmonisa adalah proses perhitungan *magnitude* dan fase dari gelombang periodik frekuensi fundamental dan orde tinggi. Deret Fourier menunjukkan hubungan antara fungsi domain-waktu dan fungsi domain frekuensi. Berdasarkan metode Fourier, suatu fungsi periodik dapat diuraikan menjadi fungsi-fungsi sinusoidal dengan frekuensi, *amplitude* dan sudut fasa tertentu apabila memenuhi syarat-syarat sebagai berikut :

- Merupakan fungsi periodik $f(\omega t) = f(\omega t + T)$ dengan T = periode
- Merupakan fungsi kontinu atau fungsi tak kontinu dengan jumlah ketidak-kontinyuan yang tertentu selama satu periode
- Selama selang periode, fungsi harus mempunyai harga rata-rata tertentu
- Dalam satu periode T , fungsi harus mempunyai harga maksimum atau minimum yang jumlahnya tertentu.

Apabila syarat-syarat diatas telah terpenuhi maka, fungsi dapat diuraikan menjadi deret Fourier dengan persamaan sebagai berikut :

$$f(\omega t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \quad (2.11)$$

dengan

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_0^T f(\omega t) d(\omega t) \quad (2.12)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(\omega t) \cos(n\omega t) d(\omega t) \quad (2.13)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(\omega t) \sin(n\omega t) d(\omega t) \quad (2.14)$$

Untuk mempercepat penyederhanaan analisa Fourier, dapat digunakan sifat-sifat khusus gelombang sebagai berikut :

- Apabila luas siklus positif dan negatif adalah sama dalam satu periode, maka $a_0 = 0$.
- Apabila $f(\omega t) = -f(\omega t + \frac{T}{2})$ atau fungsi mempunyai simetri pada setengah gelombang positif dan negatif, maka akan muncul harmonik orde ganjil.
- Apabila $f(\omega t) = f(-\omega t)$ atau fungsi genap, maka $b_n = 0$.
- Apabila $f(\omega t) = -f(-\omega t)$ atau fungsi ganjil, maka $a_n = 0$.

2.2.2 Total Harmonic Distortion (THD)

Nilai *Total Harmonic Distortion* (THD) digunakan untuk menentukan nilai harmonisa yang terjadi pada suatu sistem tenaga listrik. Nilai THD juga menyatakan jumlah tegangan atau arus yang terdistorsi. Pada sistem tenaga listrik *Total Harmonic Distortion* (THD) didefinisikan sebagai persentase total komponen harmonisa terhadap komponen fundamentalnya. Batas nilai (persentase) THD dari tegangan dan arus maksimal ini didasarkan sesuai dengan standar dari IEEE Std 519-1992.

$$THD = \frac{\left[\sum_{n=2}^k U_n^2 \right]^{\frac{1}{2}}}{U_1} \times 100\% \quad (2.15)$$

dengan :

- U_n : komponen harmonisa
- U_1 : komponen fundamental
- k : komponen harmonisa maksimum yang diamati

Tabel 2.1 Batas distorsi harmonisa untuk sistem distribusi 120 V sampai 69 kV berdasarkan standar IEEE 519-1992 [5]

Distorsi Harmonisa Arus Maksimum dalam Persen terhadap I_L						
Isc/I _L	Orde Harmonisa Individual (Harmonisa Orde Ganjil)					
	<11	11≤h≤17	17≤h≤23	23≤h≤35	35≤h	TDD
<20*	4	2	1,5	0,6	0,3	5
20-50	7	3,5	2,5	1	0,5	8
50-100	10	4,5	4	1,5	0,7	12
100-1000	12	5,5	5	2	1	15
>1000	15	7	6	2,5	1,4	20
Harmonisa orde genap dibatasi 25% dari Harmonisa orde ganjil di atas.						
Tidak diperbolehkan distorsi arus yang dihasilkan sistem DC, contohnya converter setengah gelombang.						
*Semua peralatan pembangkit listrik terbatas pada nilai-nilai distorsi arus terlepas dari Isc/I _L aktual.						
dimana :						
Isc = Arus hubung singkat maksimum pada PCC						
I _L = Arus beban maksimum (komponen frekuensi fundamental) pada PCC						

Tabel 2.1 diatas merupakan batas distorsi harmonisa arus yang diijinkan sesuai dengan standar IEEE 519-1992. Untuk batas distorsi harmonisa tegangan tersaji pada tabel 2.2.

Tabel 2.2 Batas distorsi tegangan berdasarkan IEEE Std 519-1992 [5]

Tegangan Bus Pada PCC	Distorsi Tegangan Individual (%)	THD (%)
69 kV dan ke bawah	3	5
69,001 kV sampai 161 kV	1,5	2,5
161,001 kV dan ke atas	1	1,5

Perhitungan nilai tegangan distorsi (THD_v) dan arus distorsi (THD_i) dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan berikut :

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \quad \text{dan} \quad THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \quad (2.16)$$

2.2.3 Total Demand Distortion (TDD) [5]

Total Demand Distortion merupakan perbandingan nilai rms antara komponen arus harmonisa dengan arus beban *demand* maksimum. Pada saat beban penuh $THD_i = TDD$, maka TDD merupakan besar distorsi arus pada sistem. Perhitungan nilai TDD adalah sesuai persamaan berikut:

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_L} \quad (2.17)$$

2.2.4 Sumber-Sumber Harmonisa

Pada umumnya, terjadinya harmonisa disebabkan karena pengoperasian beban non linier. Berdasarkan klasifikasi pembebanan pada sistem tenaga listrik dibedakan menjadi beban linier dan non linier. Beban linier adalah beban yang memiliki nilai arus berbanding secara linier terhadap tegangan beban. Sehingga pada beban linier nilai gelombang arus akan sama dengan nilai gelombang tegangan beban. Karakteristik beban non linier berbeda dengan beban linier, yaitu bentuk gelombang yang ditarik oleh beban non linier ini tidak berbentuk sinusoidal tetapi periodik. Hal tersebut menyebabkan nilai arus tidak sama dengan nilai gelombang tegangan, sehingga terjadi harmonisa.

2.2.4.1 Konverter

Konverter dapat menimbulkan terjadinya distorsi gelombang, hal tersebut dikarenakan di dalam konverter mengandung komponen *switching*. Konverter merupakan peralatan elektronika daya yang berfungsi untuk mengkonversi sumber masukan menjadi sumber keluaran yang diinginkan. Beberapa peralatan yang mengandung konverter adalah:

- a. *Uninterruptible Power Supply* (UPS).
- b. Lampu *flourescent*, dimmer.
- c. *Charger* baterai.
- d. *Variable Frequency drive* (VFD).
- e. Perangkat elektronik untuk rumah tangga (TV, *microwave*, pemanas).
- f. Komputer.

2.2.4.2 Tanur Busur Listrik (*Electric Arc Furnace*)

Electric Arc Furnace merupakan peralatan utama pada industri pengecoran logam atau pembuatan besi baja. Tanur busur listrik berfungsi untuk melebur biji besi dalam industri logam. Tanur busur listrik adalah elemen beban non linier dan biasanya merupakan sumber harmonisa arus terbesar diantara sumber-sumber harmonisa yang lain. Selain menyebabkan harmonisa, *Electric Arc Furnace* juga banyak menyebabkan permasalahan lain dalam lingkup kualitas daya. Permasalahan tersebut seperti :

- a. Distorsi harmonik
- b. Kedip tegangan (*flicker*)
- c. Ketidakseimbangan tegangan
- d. Gangguan guncangan frekuensi

Selama *arc furnace* beroperasi, hampir selalu tidak dalam keadaan stabil. Hal ini disebabkan oleh pengaruh perubahan elektroda, interaksi gaya elektromagnetik busur dan pengaruh riak permukaan biji yang telah melebur. Bentuk gelombang arus tanur busur listrik pada setiap periode gelombang mempunyai bentuk yang tidak sama sehingga bentuk gelombang arus dari *arc furnace* bukanlah bersifat periodik. Oleh karena itu, dalam hal ini tidak bisa dibuat persamaan gelombangnya. Level arus pada yang diakibatkan oleh *arc furnace* bergantung pada referensi yang ditentukan.

2.2.4.3 Transformator

Peralatan-peralatan yang mengalami saturasi seperti transformator dan peralatan elektromagnetik lainnya dengan inti besi, termasuk juga motor-motor (mesin-mesin berputar) merupakan sumber harmonik. Harmonik tersebut dibangkitkan oleh karakteristik magnetisasi besi yang non linier.

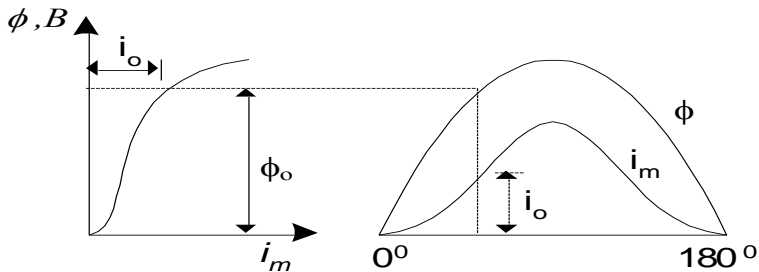
Pada saat transformator tidak berbeban, tegangan primer trafo sebanding dengan *Electromotive Force* (EMF) balik karena efek resistansi belitan dan reaktansi bocor diabaikan pada arus rendah. Tegangan tersebut dapat dinyatakan dengan :

$$e_1 = -N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad (2.18)$$

Dari persamaan di atas dapat diperoleh rata-rata fluks :

$$\phi = -\int \frac{e_1}{N_1} dt = \frac{E_m}{N_1 \omega} \sin \omega t = \phi_m \sin \omega t \quad (2.19)$$

Berarti bahwa tegangan primer yang sinusoidal akan menghasilkan fluks yang sinusoidal pula pada keadaan transformator tidak berbeban. Pada inti ideal tanpa rugi-rugi histeresis, hubungan fluks dan arus magnetisasi I_m ditentukan oleh kurva magnetisasi bahan besi yang digunakan didalam laminasinya seperti terlihat pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Magnetisasi Transformator (tanpa histeresis) meliputi :
Kurva Magnetisasi, Bentuk Gelombang Fluks dan Arus Magnetisasi

Suatu cara yang tepat untuk menangani harmonisa pada transformator adalah dengan memperlengkapi sambungan netral. Jadi dengan demikian sambungan netral adalah salah satu solusi untuk meredam harmonisa pada sistem Y-Y. Tetapi selain manfaat tersebut, pada beberapa jenis sambungan transformator, sambungan netral juga menghasilkan keuntungan-keuntungan sebagai berikut :

1. Sebagai jalur bagi arus yang tidak seimbang karena beban tidak seimbang.

2. Untuk memperkecil atau mengurangi kenaikan pada tegangan fasa yang tidak terganggu apabila ada salah satu fasa yang mengalami gangguan tanah (hubung singkat ke tanah).

2.2.4.4 Mesin-Mesin Berputar

Motor induksi dan generator sinkron pada umumnya dapat menghasilkan sejumlah harmonik. Pada generator sinkron, harmonik disebabkan oleh kejenuhan dan distribusi fluks yang tidak sinusoidal sehingga terbangkit *Electromotive Force* (EMF) yang tidak sinusoidal yang akan menghasilkan arus harmonik bila dibebani.

Upaya yang dilakukan untuk menekan tingkat distorsi sampai sekecil mungkin sehingga dapat diabaikan pada pembuatan generator sinkron adalah dengan memperhatikan hal-hal berikut, diantaranya :

- a) Sudut konduktor kumparan (*coil pitch*) dibuat kurang dari 180° listrik. Hal ini dimaksudkan untuk mengurangi magnitudo harmonik.
- b) Distribusi kerapatan *fluks* pada celah udara dibuat mendekati sinusoidal.
- c) Menggunakan hubungan Y pada stator sehingga tidak muncul harmonik ketiga pada terminal generator.

2.2.5 Pengaruh yang Ditimbulkan oleh Harmonisa

Pada umumnya besar-kecilnya pengaruh yang ditimbulkan oleh harmonisa bergantung pada nilai sumber harmonisa, letak sumber harmonisa dan karakteristik sistem jaringan kelistrikan yang digunakan. Akibat yang terjadi karena efek harmonik dapat diklasifikasikan menjadi dua, yaitu efek seketika (*instantaneous effects*) dan efek jangka panjang (*long-term effects*). Kategori yang termasuk pada efek seketika, contohnya adalah mengganggu pengoperasian kontroler pada sistem elektronik. Harmonik juga dapat menyebabkan salah pembacaan (*missreading*) pada pengukuran peralatan besaran listrik. Gelombang terdistorsi pada saluran menimbulkan interferensi pada saluran komunikasi dan rangkaian kontrol atau monitoring.

Pada efek jangka panjang (*long-term effects*) yang sering terjadi adalah *overheating*, misalnya pada kapasitor, mesin-mesin listrik maupun transformator terjadi karena adanya rugi-rugi energi tambahan akibat harmonik. Pada kabel dan peralatan, rugi-rugi energi tambahan ini disebabkan oleh bertambahnya nilai rms arus untuk daya aktif yang sama. bertambahnya resistansi inti adalah sebanding dengan naiknya frekuensi.

2.2.5.1 Rugi-rugi pada Saluran Transmisi dan Kabel

Pengaruh yang terjadi pada saluran transmisi dan kabel adalah berupa bertambahnya rugi-rugi transmisi yang disebabkan oleh meningkatnya nilai rms gelombang arus. Berikutnya aliran arus harmonisa juga menyebabkan terjadinya drop tegangan diantara rangkaian impedansi. Akibatnya kabel dan isolator lainnya akan mengalami *stress* tegangan berlebih dan korona. Hal tersebut dapat menyebabkan kegagalan isolasi bahkan mempercepat penuaan (*aging*). Dari segi pengukuran juga dapat terjadi kesalahan. Alat ukur yang bekerja berdasarkan induksi seperti : *watt-hour meter*, dirancang dan dikalibrasi untuk gelombang sinus. Harmonisa membangkitkan tambahan kopel atau *torque electromagnetic* pada *disk*, sehingga hasil pengukurannya menjadi lebih tinggi. Berikut adalah persamaan rugi-rugi transmisi yang disebabkan karena peningkatan nilai rms arus akibat harmonisa :

$$\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2 R \quad (2.20)$$

In merupakan nilai arus harmonik ke-n dan R adalah resistansi sistem.

2.2.5.2 Pengaruh Pada Faktor Daya

Pada umumnya beban-beban listrik dari suatu sistem tenaga listrik mempunyai faktor kerja *lagging* atau bersifat induktif. Beban-beban tersebut antara lain motor-motor induksi, trafo daya, beban konverter dan lain-lain menarik arus magnetisasi dari jaringan sehingga beban-beban tersebut membutuhkan daya reaktif dari jaringan sistem tenaga listrik. Apabila kebutuhan daya reaktif sangat besar, maka dapat mengakibatkan faktor daya menjadi makin kecil, sedangkan berkurangnya faktor daya dapat menimbulkan berbagai kerugian baik pada pihak pembangkit maupun pihak konsumen.

Adapun kerugian pada pihak konsumen antara lain :

- a. Perbedaan tegangan listrik pada kondisi beban ringan dan beban penuh relatif besar. Hal ini berarti pengaturan tegangan menjadi buruk.
- b. Instalasi listrik dengan pembatasan arus tertentu dan untuk melayani daya tertentu (kW) akan memerlukan kapasitas yang lebih besar.

Kerugian pihak pembangkit adalah sebagai berikut :

- a. Menurunnya efisiensi peralatan, seperti transformator daya dan jaringan penghantar. Dalam hal ini untuk daya aktif yang sama, menurunnya faktor daya akan menambah besar arus yang melalui peralatan tersebut, sehingga rugi-rugi daya akan bertambah besar. Dengan demikian efisiensi peralatan akan menurun.
- b. Drop tegangan akan menjadi lebih besar.

2.2.5.3 Pengaruh terhadap Sistem Proteksi

Pengaruh harmonisa pada sistem proteksi dapat berupa salah pembacaan pada peralatan sehingga sistem proteksi bekerja tidak sesuai dengan *setting* yang telah ditentukan dapat mengakibatkan gangguan pengamanan. Hal ini sangatlah berbahaya karena dengan terjadinya kesalahan proteksi akibat harmonik yang timbul, akan menggagalkan pengamanan peralatan apabila terjadi gangguan. Beberapa pengaruh lain diantaranya adalah :

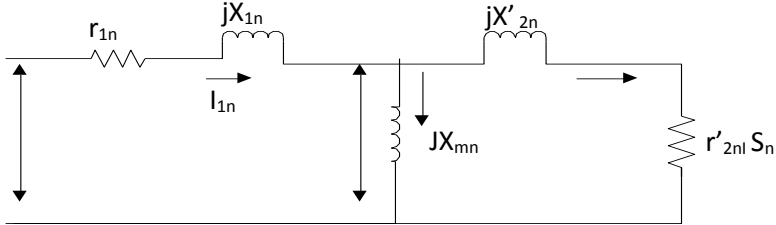
1. Terjadinya penurunan *rating* akibat pemanasan yang timbul.
2. Terjadinya peningkatan panas dan rugi-rugi pada komponen *switchgear* yang akan menyebabkan penurunan kemampuan mengalirkan arus sehingga dapat mempersingkat umur dari komponen isolator.
3. Timbul getaran mekanis pada panel listrik yang merupakan getaran resonansi mekanis akibat harmonisa frekuensi tinggi.
4. Dengan timbulnya harmonisa dapat memberi tambahan torsi pada kWh-meter yang berjenis elektromagnetis piringan berputar. Akibatnya akan terjadi kesalahan pengukuran karena piringan akan berputar lebih cepat.
5. Triplen harmonisa pada kawat netral dapat memberikan induksi harmonisa yang mengganggu sistem telekomunikasi.
6. *Circuit breaker* akan bekerja tidak sesuai dengan *setting* karena CB akan bekerja di bawah arus pengenalnya bahkan mungkin tidak bekerja pada arus pengenal.

2.2.5.4 Pengaruh Pada Mesin-Mesin Berputar

Harmonisa berpengaruh pada mesin berputar seperti : motor dan generator. Hal tersebut disebabkan karena tegangan dan arus harmonisa menimbulkan penambahan rugi-rugi pada belitan stator dan rotor serta laminasi pada stator dan rotor. Untuk menghasilkan tingkat distorsi yang

sekecil mungkin sehingga dapat diabaikan dalam pembuatan generator sinkron memperhatikan hal-hal sebagai berikut :

- Distribusi kerapatan *fluks* pada celah udara dibuat mendekati sinusoidal.
- Sudut konduktor kumparan (*coil pitch*) dibuat kurang dari 180° listrik. Hal ini dimaksudkan untuk mengurangi *magnitude* harmonik.



Gambar 2.8 Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi Untuk Harmonik Ke-n

Rangkaian penyederhanaan (ekivalen) yang paling umum pada mesin induksi digambarkan pada Gambar 2.8. Pada gambar diatas resistansi *core* (R_c) diabaikan karena memiliki arus yang kecil.

Semua parameter diatas berhubungan dengan frekuensi dari arus belitan. Arus harmonik timbul pada stator mesin AC menghasilkan aksi motor slip harmonik positif, S_n . Aksi motor ini menghasilkan torsi *shaft* pada arah sesuai dengan kecepatan medan harmonik sehingga semua harmonik urutan positif memperkuat torsi poros sedangkan harmonik urutan negatif bertindak sebaliknya.

Untuk harmonik I_n torsi perfasa dinyatakan sebagai

$$T_n = \left(\frac{I_n^2}{n} \right) \left(\frac{r'_{2n}}{S_n} \right) \quad (2.21)$$

apabila S_n mendekati 1 maka persamaan di atas menjadi

$$T_n = \left(\frac{I_n^2}{n} \right) r'_{2n} \quad (2.22)$$

Dengan menggunakan hubungan $V_n = I_n Z_n$ dan $Z_n = nX_l$, torsi dapat dinyatakan dalam bentuk tegangan harmonik yaitu:

$$T_n = \left(\frac{V_n^2}{n^3} \right) \left(\frac{r_{2n}}{X_l^2} \right) \quad (2.23)$$

Karena slip pada frekuensi harmonik mendekati harga satu, maka torsi yang dihasilkan oleh arus harmonik sangat kecil dan juga torsi kecil yang terjadi berpasangan sehingga dapat saling menghilangkan. Oleh karena itu, pengaruh harmonik pada torsi rata-rata pada beberapa kasus dapat diabaikan.

2.2.5.5 Pengaruh Terhadap Transformator

Aliran arus harmonisa akan meningkatkan rugi-rugi histerisis dan arus *Eddy* serta tekanan isolasi pada transformator. Arus urutan nol yang bersirkulasi menyebabkan pemanasan yang berlebih. Dampak langsung yang dirasakan pada transformator ketika terdapat harmonisa adalah bertambahnya temperatur transformator tersebut. Dengan naiknya temperatur tersebut akan menyebabkan kerugian sebagai berikut :

1. Bertambahnya rugi-rugi daya akan mengurangi kapasitas pembebanan transformator.
2. Mengurangi kemampuan arus maksimum.
3. Mengurangi umur dari transformator tersebut.

Untuk mengatasi pemanasan berlebih akibat harmonisa, pada umumnya kapasitas transformator diperbesar dengan tujuan memperbesar kapasitas pendinginan. Akan tetapi, hal ini akan menimbulkan masalah baru karena konduktor yang lebih besar menyebabkan pemanasan yang lebih besar pula akibat harmonisa frekuensi tinggi. Penambahan kapasitas transformator juga akan mengakibatkan bertambahnya arus harmonisa yang mengalir pada sistem.

2.3 Filter Harmonisa

Penggunaan bersama antara filter pasif dan aktif dapat didesain untuk meminimalisasi arus dan tegangan harmonisa dalam sistem tenaga listrik. Dengan penambahan filter harmonisa pada suatu sistem tenaga listrik yang mengandung sumber harmonisa, maka penyebaran arus harmonisa keseluruh jaringan dapat ditekan sekecil mungkin. Selain itu filter harmonisa pada frekuensi fundamental juga dapat mengkompensasi daya reaktif sehingga dapat dipergunakan untuk memperbaiki faktor daya sistem.

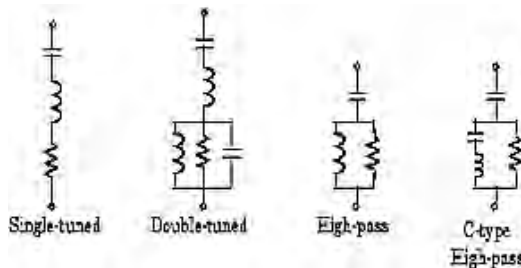
2.3.1 Filter Pasif

Filter pasif merupakan salah satu metode penyelesaian yang umum digunakan di pasaran. Hal tersebut dikarenakan filter pasif memiliki nilai yang lebih ekonomis. Pada umumnya filter pasif berfungsi untuk mengurangi amplitudo satu atau lebih frekuensi tertentu dari sebuah tegangan atau arus melalui jalur yang rendah nilai impedansinya pada frekuensi harmonisa tertentu. Ada dua macam filter pasif yaitu filter pasif seri dan filter pasif paralel. Filter pasif seri memiliki karakteristik sebagai resonansi paralel dan merupakan tipe filter yang bersifat sebagai penghalang, yang memiliki impedansi tinggi pada frekuensi tertentu. Sedangkan filter pasif paralel memiliki karakteristik sebagai resonansi seri dan merupakan filter yang bertipe trap yang memiliki impedansi yang rendah pada frekuensi tertentu.

Filter pasif ini mempunyai beberapa bentuk, berdasarkan susunan rangkaian komponen-komponen penyusunnya. Secara umum filter pasif dapat dibedakan dalam tiga jenis :

- Filter dengan penalaan tunggal (*Single Tuned Shunt Filter*).
- Filter dengan penalaan ganda (*Double Tuned Filter*).
- *High Pass Damp Filter Type*.

Berikut adalah gambar rangkaian filter pasif dari tipe tersebut :



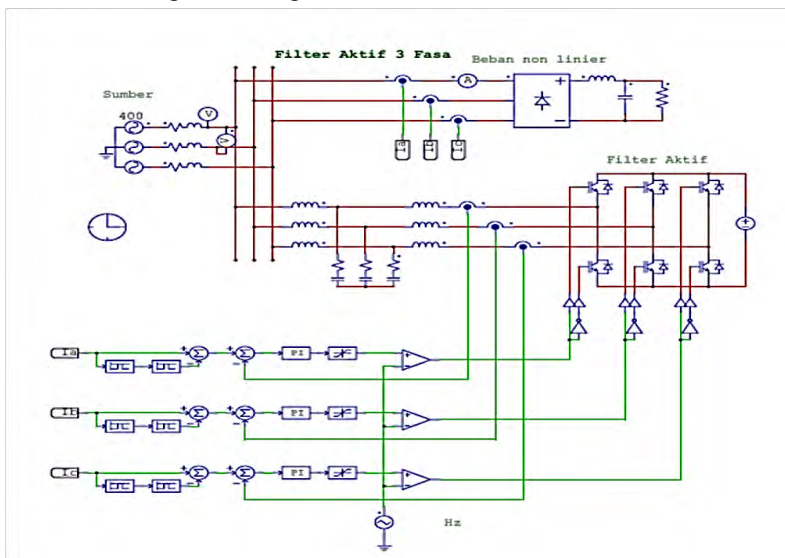
Gambar 2.9 Berbagai Tipe Rangkaian Filter Pasif

2.3.2 Filter Aktif

Filter aktif jika dimodelkan pada sistem dapat berupa seri maupun paralel. Prinsip dasar dari Filter aktif adalah menggunakan teknologi elektronika daya untuk menghasilkan komponen arus spesifik yang bertujuan untuk menggagalkan komponen arus harmonisa yang dihasilkan oleh beban non linier. Prinsip kerja filter aktif seri adalah

berfungsi sebagai penahan arus harmonisa yang berasal dari beban menuju ke sumber. Prinsip kerja filter aktif parallel adalah dengan menyuntikkan atau menginjeksikan arus harmonisa dengan sudut fasa yang berkebalikan dengan arus harmonisa yang dihasilkan oleh beban non linier. Konsep filter aktif dengan PWM (*Pulse Width Modulation*) berbasis inverter yaitu penggunaan arus harmonisa untuk menanggulangi arus harmonisa dari beban non linier yang ada pada sistem tenaga listrik.

Inverter ini menggunakan sumber tegangan dc sebagai *supply* dan dapat melakukan proses *switching* pada frekuensi tinggi untuk menghasilkan sinyal yang mampu mengatasi arus harmonisa yang dihasilkan beban non linier. Penggunaan VSI (*Voltage source Inverter*) untuk memungkinkan pengaturan arus harmonisa pada filter aktif.. Berikut adalah gambar rangkaian dari filter aktif :



Gambar 2.10 Rangkaian Filter Aktif

Rangkaian utama penyusun filter aktif terdiri atas komponen berbasis elektronika daya. Komponen tersebut diantaranya: kontrol PI, inverter tiga fasa dan PWM. Berikut adalah fungsi dari masing-masing komponen pada rangkaian tersebut.

2.3.2.1 Kontrol PI

Komponen ini berfungsi sebagai pereduksi sinyal kesalahan, yaitu perbedaan antara sinyal setting dengan sinyal aktual. Hal tersebut bertujuan untuk mendapatkan sinyal aktual (yang diinginkan) sama dengan sinyal *setting*. Kinerja sistem kontrol tersebut dapat dilihat melalui kondisi sinyal, semakin cepat reaksi dari sistem mengikuti sinyal aktual dan semakin kecil kesalahan maka sistem kontrol tersebut semakin baik kinerjanya.

Kontrol proporsional (K_p) mempunyai keluaran (output) yang sebanding dengan nilai besarnya sinyal kesalahan (selisih antara besaran yang diinginkan dengan nilai aktualnya). Dapat dikatakan output dari kontrol proporsional adalah perkalian antara konstanta proporsional dengan nilai masukannya. Oleh karena itu, apabila terjadi perubahan nilai dari sinyal masukan maka keluaran sistem akan berubah sebesar nilai konstanta pengalinya.

Kontrol integral sebagai penghasil respon sistem yang memiliki kesalahan kondisi *steady state* nol. Dengan kontrol integral, respon sistem dapat diperbaiki dengan mempunyai tingkat kesalahan pada kondisi *steady state* nol.

2.3.2.2 Pulse Width Modulation (PWM)

Sinyal yang akan diolah oleh PWM adalah hasil sinyal dari kontrol PI. Kontrol PI menghasilkan arus referensi (I_{ref}) yang digunakan sebagai masukan PWM. Sinyal referensi ini kemudian dimodulasikan dengan sinyal *carrier* (*triangular wave*) yang berupa sinyal gigi gergaji. Sinyal *error* ini berbentuk sinusoidal yang akan dimodulasikan dengan sinyal gigi gergaji sebagai sinyal *carrier*. Pada prosesnya, modulasi dilakukan oleh komparator, masukan dari komparator terdiri dari kutub positif dan negatif. Sinyal yang akan dimodulasi dihubungkan pada kutub positif sedangkan kutub negatif dihubungkan ke sinyal *carrier*. Output yang dihasilkan dari komparator berbentuk pulsa *off* dan *on*. Prinsip kerja komparator adalah pulsa keluaran akan *on* apabila sinyal yang dimodulasikan lebih besar atau lebih positif jika dibandingkan dengan sinyal *carrier* serta begitu pula dengan kondisi sebaliknya.

2.3.2.3 Inverter Tiga Fasa

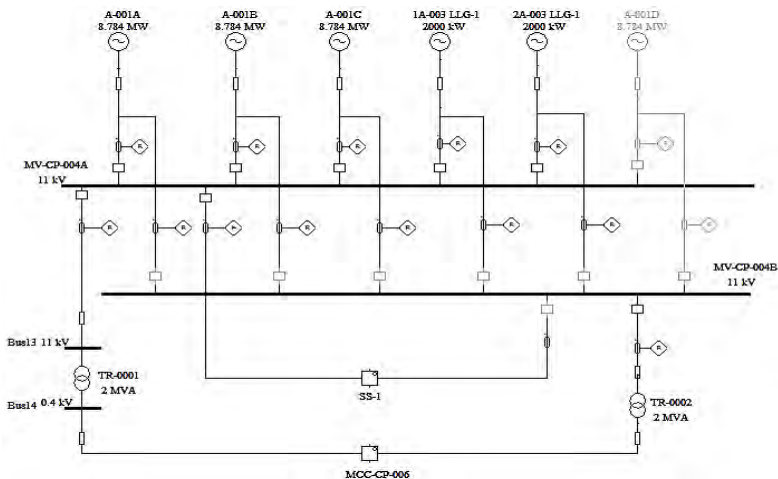
Pada sistem tenaga listrik, fungsi dari inverter adalah menkonversi sumber DC menjadi AC. Hal ini dapat diperoleh dengan adanya pengaturan *switching* pada rangkaian inverter. Pada dasarnya jenis inverter dibagi menjadi dua macam, yakni *Voltage Source Inverter* (VSI) dan *Current Source Inverter* (CSI). VSI menggunakan sumber tegangan sedangkan CSI menggunakan sumber arus. Pada penggunaan filter ini inverter VSI yang umum dipakai adalah berjenis *Sinusoidal Pulse Width Modulation* (SPWM). Penggunaan inverter jenis ini memungkinkan keluaran hasil arus berbentuk sinusoidal serta untuk mengatur frekuensi dan *Magnitude* yang dihasilkan cukup dengan mengontrol rangkaian inverter dengan tegangan sumber yang konstan.

BAB III

SISTEM KELISTRIKAN PROYEK PAKISTAN DEEP WATER CONTAINER PORT

3.1 Sistem Kelistrikan Proyek Pakistan Deep Water Container Port

Pakistan Deep Water Container Port merupakan proyek pembangunan pelabuhan peti kemas yang berada di kota Karachi, Pakistan. Sebagai salah satu pelabuhan terbesar di Pakistan, *Pakistan Deep Water Container Port* harus memenuhi target dalam jumlah proses bongkar-muat kapal-kapal kargo, baik dalam skala lokal maupun internasional per-harinya. Terdapat 7 unit pembangkit yang ada di *Pakistan Deep Water Container Port*. Kapasitas masing-masing pembangkit diantaranya : 4 unit kapasitas 8.784 MW, 2 unit kapasitas 2000 kW dan 1 unit berkapasitas 815 kW. Pembangkit utama terhubung menuju beban melalui 2 bus utama, yaitu : MV-CP-004A dan MV-CP-004A. Pada *plant* ini terdapat 2 buah *network utility* utama, yaitu SS-1 dan MCC-CP-006. Pada *network utility* tersebut, di dalamnya terdapat semua beban yang ada pada *plant* ini. Beban-beban tersebut seperti : motor, *lump*, dsb. Berikut adalah gambar sistem kelistrikan *plant* tersebut:



Gambar 3.1 *Single Line Diagram* Sistem Kelistrikan Utama Proyek Pakistan Deep Water Container Port

3.2 Pembangkitan dan Pembebanan Proyek Pakistan Deep Water Container port

Pembangkit yang terdapat pada Proyek *Pakistan Deep Water Container port* berjumlah 7 unit. Berdasarkan *single line diagram*, terdapat 5 unit pembangkit yang aktif beroperasi sedangkan 2 pembangkit difungsikan sebagai *back-up* ketika kelima generator yang aktif beroperasi tersebut mengalami gangguan dan pada saat starting motor-motor berkapasitas besar yang ada pada plant tersebut. Kapasitas pada masing-masing pembangkit tercantum pada tabel 3.1 berikut :

Tabel 3.1 Data Kapasitas Pembangkit

No	ID	MW	MVar	kV	%PF
1	A-001A (<i>Swing</i>)	8.784	4.821	11	80
2	A-001B (<i>Voltage Control</i>)	8.784	2.812	11	80
3	A-001C (<i>Voltage Control</i>)	8.784	2.812	11	80
4	1A-003 LLG 1 (<i>MVar Control</i>)	2	0.5	11	80
5	2A-003 LLG 1 (<i>MVar Control</i>)	2	0.5	11	80
6	A-001D (<i>Swing Backup</i>)	8.784	0	11	80
7	A-001E (<i>Voltage Control Backup</i>)	0.815	0	11	85

Sedangkan untuk jumlah pembangkitan, pembebanan dan *demand* pada *plant* tersebut dapat dilihat pada Tabel 3.2 berikut :

Tabel 3.2 Data Kapasitas Pembangkit

Nama	MW	Mvar	MVA	%PF
<i>Source (Swing Bus)</i>	22.898	11.887	25.858	88.75 Lag
<i>Source (Non Swing Bus)</i>	0	0	0	-
<i>Total Demand</i>	22.898	11.887	25.858	88.75 Lag
<i>Total Motor Load</i>	21.444	10.69	23.961	89.5 Lag
<i>Total Static Load</i>	1.305	0.937	1.606	81.23 Lag

3.3 Sistem Distribusi pada Proyek Pakistan Deep Water Container Port

Pada Proyek *Pakistan Deep Water Container Port*, sistem distribusi yang digunakan adalah bertipe radial. Daya yang dihasilkan dari kelima generator yang aktif beroperasi, yaitu generator A001, A-001B, A-001C, 1A-003 LLG-1, dan 2A-003 LLG-1 disalurkan menuju beban yang terdapat pada *network utility* SS-1 dan MCC-CP-006. Untuk penyaluran daya pada *network utility* SS-1 dilakukan secara langsung dikarenakan berada pada level tegangan yang sama, yakni 11 KV. Sedangkan untuk penyaluran pada *network composite utility* MCC-CP-006, digunakan transformator step-down TR-0001 yang bekerja menurunkan level tegangan dari 11 KV menjadi 0.4 KV. Untuk meningkatkan keandalan dalam proses pendistribusian, pada proyek ini dibuat jalur back-up. Hal tersebut bertujuan agar proses distribusi tetap berjalan ketika salah satu saluran mengalami gangguan.

3.3.1 Composite Network SS-1

Pada *Composite Network* SS1 terdapat beberapa beban dan *Composite Network*. Beban tersebut berupa *Lump Load*, yakni *lump 1* dan *lump 2* yang masing – masing berkapasitas 200 kVA. Untuk menyuplai *Lump Load* tersebut digunakan transformator *step-down* karena beban tersebut berada pada *rating* tegangan 0.4 kV. Selain itu, pada *Composite Network* SS1 juga terdapat *Composite Network* lagi, yakni SS-6, SS7, SS-2 dan SS. Di dalam *network* SS-6 terdapat 8 unit motor induksi yang dikontrol dengan VFD, 6 motor berkapasitas 2000 kW dan 2 motor berkapasitas 700 kW. Penggunaan VFD inilah yang menjadi sumber utama harmonisa pada *plant* ini. Harmonisa yang terjadi pada bus yang ada pada *network* ini mencapai 20.74% untuk tegangan dan 46.88% untuk arus. Nilai tegangan yang ada pada bus yang normalnya 11 kV naik menjadi 11.22 kV. Oleh karena itu, pada bus inilah pemasangan filter *hybrid* difokuskan karena peredaman harmonisa akan maksimal apabila pemasangan filter berada satu bus dengan sumber harmonisa. Selain itu, pada *network* SS-6 juga terdapat *lump load* berkapasitas 250 kVA dan tranformator *step-down* 11 – 0.4 kV untuk menyuplai beban tersebut.

Pada *network* SS-7 terdapat 8 unit motor induksi yang dikontrol dengan VFD, Semua motor tersebut berkapasitas 2000 kW. Pada *network* SS-7 juga terdapat *lump load* berkapasitas 250 kVA dan tranformator *step-down* 11 – 0.4 kV untuk menyuplai beban tersebut. Pada hasil

simulasi harmonisa pada *network* SS-7 didapat THDv sebesar 20.66% dan THDi sebesar 45.11%. Nilai tegangan yang awalnya 11 kV juga naik menjadi 11.22 kV. Selain pada *network* SS-6, pemasangan filter *hybrid* juga difokuskan pada bus yang ada pada *network* SS-7 ini. Diharapkan dengan pemasangan filter pada kedua *network* tersebut (SS-6 dan SS-7) yang merupakan sumber utama harmonisa, mampu meminimalkan atau menghilangkan nilai distorsi harmonisa yang terjadi pada *plant* ini. Di dalam *network* SS-2 terdapat 8 unit motor berkapasitas 150x20 kW pada level tegangan 0.4 kV. Untuk menyuplai beban motor tersebut digunakan transformator step-down 11-0.4 kV sebanyak 8 unit. Selain itu, terdapat juga beban berupa *lump load* berkapasitas 315 kVA dan transformator *step-down* 11-0.4 kV untuk menyuplai *lump load* tersebut. Pada *network* SS terdapat 2 unit transformator *step-down* 11-0.4 kV yang digunakan untuk menyuplai beban berupa *lump load* yang berjumlah 2 unit dengan kapasitas masing-masing 1581 kVA dan 1500 kVA.

3.3.2 Composite Network MCC-CP-006

Berdasarkan gambar *single line diagram*, semua beban yang terdapat pada *network* MCC-CP-006 berada pada level tegangan 0.4 kV. Oleh karena itu sebagian besar beban yang berada pada *network* ini berkapasitas kecil. Beban-beban tersebut terdiri dari lump load, motor, static load dan charger. Rinciannya adalah 2 buah *Induction Machine* kapasitas 15.5 kW, 2 buah *Induction Machine* kapasitas 11 kW, 4 buah *Induction Machine* kapasitas 0.8 kW, 1.6 kW, 37 kW, dan 30 kW. Selain itu terdapat juga beban 6 buah DC *Charger* dan 16 buah beban *static*. Untuk lebih jelasnya, berikut adalah tabel berisikan data dari transformator dan motor yang terdapat pada Proyek *Pakistan Deep Water Container Port*.

Tabel 3.3 Data Transformator Distribusi pada Proyek *Pakistan Deep Water Container Port*

No	ID	MVA	Rating (kV)	%Z	Konfigurasi
1	TR-0001	2	11/0.4	12.5	Delta/Wye
2	TR-0002	2	11/0.4	6	Delta/Wye
3	T1	2.5	11/0.4	6	Delta/Wye
4	T3	0.2	11/0.4	4	Delta/Wye
5	T4	0.2	11/0.4	4	Delta/Wye

Tabel 3.3 Data Transformator Distribusi pada Proyek Pakistan Deep Water Container Port (Lanjutan)

No	ID	MVA	Rating (kV)	%Z	Konfigurasi
6	T5	0.25	11/0.4	4	Delta/Wye
7	T6	0.25	11/0.4	4	Delta/Wye
8	T7	1.25	11/0.4	5	Delta/Wye
9	T8	1.25	11/0.4	5	Delta/Wye
10	T9	1.25	11/0.4	5	Delta/Wye
11	T10	1.25	11/0.4	5	Delta/Wye
12	T11	0.315	11/0.4	6	Delta/Wye
13	T12	1.25	11/0.4	5	Delta/Wye
14	T13	1.25	11/0.4	5	Delta/Wye
15	T14	1.25	11/0.4	5	Delta/Wye
16	T15	1.25	11/0.4	5	Delta/Wye
17	T17	2.5	11/0.4	6	Delta/Wye

Tabel 3.4 Data Beban Motor 11 kV pada Proyek Pakistan Deep Water Container Port

No	ID	kW	kVA	kV	%PF
1	Mtr1	700	810	11	92.34
2	Mtr2	700	810	11	92.34
3	Mtr3	2000	2200	11	92.81
4	Mtr4	2000	2200	11	92.81
5	Mtr5	2000	2295	11	92.78
6	Mtr6	2000	2295	11	92.78
7	Mtr7	2000	2295	11	92.78
8	Mtr8	2000	2295	11	92.78
9	Mtr9	2000	2199	11	92.38
10	Mtr10	2000	2453	11	85.24

Tabel 3.4 Data Beban Motor Proyek pada Pakistan Deep Water Container Port (Lanjutan)

No	ID	kW	kVA	kV	%PF
11	Mtr11	2000	2200	11	92.81
12	Mtr12	2000	2200	11	92.81
13	Mtr17	2000	2295	11	92.78
14	Mtr18	2000	2295	11	92.78
15	Mtr19	2000	2295	11	92.78
16	Mtr20	2000	2295	11	92.78

3.4 Sumber Harmonisa pada Proyek Pakistan Deep Water Container Port

Terjadinya harmonisa disebabkan oleh adanya pengoperasian beban-beban non linier pada *plant* tersebut. Distorsi harmonisa yang terjadi pada Proyek Pakistan Deep Water Container port merupakan kontribusi dari *Variable Frequency Drive* (VFD) dan transformator. Hal tersebut menyebabkan *Total Harmonic Distortion* (THD) maupun *Individual Harmonic Distortion* (IHD) arus dan tegangan melebihi standar IEEE 519-1992.

Pada Proyek Pakistan Deep Water Container port, VFD digunakan sebagai pengatur kecepatan motor induksi yang digunakan untuk bongkar – muat *container* di pelabuhan. Pada prinsipnya, VFD menggunakan komponen elektronika daya yang dapat memberi variasi frekuensi masukan ke motor induksi. Penggunaan VFD bertujuan untuk mengatasi terjadinya arus *starting* motor yang sangat tinggi.

Tabel 3.5 Data VFD pada Motor Sebagai Penghasil Harmonik

No	ID	Manufacturer	Model	Type
1	VFD 1	ABB	ACS600 6P	Current Source
2	VFD 2	ABB	ACS600 6P	Current Source
3	VFD 3	ABB	ACS600 6P	Current Source
4	VFD 4	ABB	ACS600 6P	Current Source
5	VFD 5	ABB	ACS600 6P	Current Source
6	VFD 6	ABB	ACS600 6P	Current Source

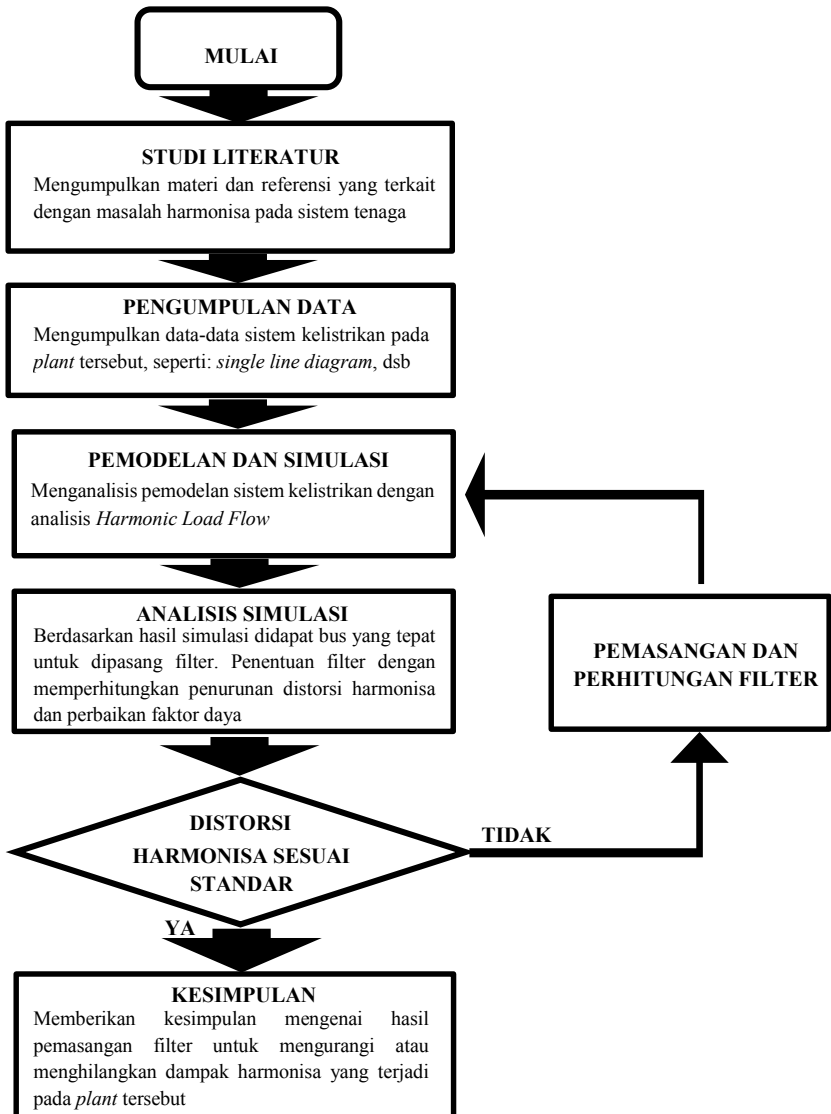
Tabel 3.5 Data VFD pada Motor Sebagai Penghasil Harmonik (Lanjutan)

No	ID	Manufacturer	Model	Type
7	VFD 7	ABB	ACS600 6P	Current Source
8	VFD 8	ABB	ACS600 6P	Current Source
9	VFD 9	ABB	ACS600 6P	Current Source
10	VFD 10	ABB	ACS600 6P	Current Source
11	VFD 11	ABB	ACS600 6P	Current Source
12	VFD 12	ABB	ACS600 6P	Current Source
13	VFD 13	ABB	ACS600 6P	Current Source
14	VFD 14	ABB	ACS600 6P	Current Source
15	VFD 15	ABB	ACS600 6P	Current Source
16	VFD 16	ABB	ACS600 6P	Current Source

3.5 Langkah-langkah Peredaman Harmonisa pada Proyek Pakistan Deep Water Container Port

Tujuan dari pengerjaan Tugas Akhir ini adalah untuk meredam bahkan menghilangkan frekuensi harmonisa yang timbul akibat adanya beban motor berkapasitas besar yang dikontrol dengan VFD. Oleh karena itu, dilakukan simulasi sistem kelistrikan pada *plant* tersebut. Hasil yang didapat dari simulasi tersebut menjadi acuan dalam penentuan spesifikasi filter yang akan dipasang pada *plant* tersebut.

Untuk mengawali pengerjaan Tugas Akhir ini, dilakukan pelengkapan data dari *Single Line Diagram* (SLD), *datasheet* dari peralatan, serta referensi-referensi yang diperlukan. Setelah itu, pemodelan dilakukan dengan menggunakan *software* ETAP 11.0.0. Dengan menggunakan *software* tersebut dapat dianalisa bagaimana aliran daya dan harmonisa yang terjadi. Analisis harmonisa berfokus pada bus-bus yang paling berdekatan dengan beban motor yang dikontrol oleh VFD, karena pada umumnya darisanalah sumber frekuensi harmonisa timbul. Dengan analisis tersebut didapatkan orde harmonisa yang dominan terjadi pada bus-bus yang dianalisis, kemudian hasil analisis tersebut digunakan untuk mendesain filter pasif sebagai peredaman harmonisa yang terjadi sekaligus untuk mengkompensasi daya reaktif sebagai perbaikan faktor daya. Barulah jika filter pasif belum dapat meredam seluruh sumber harmonisa yang timbul, perlu dilakukan penambahan filter aktif kedalam sistem. Metodologi dalam tugas akhir ini digambarkan dalam *flowchart* pada Gambar 3.2. sebagai berikut :



Gambar 3.2 *Flowchart* Pengerjaan Tugas Akhir

BAB IV

SIMULASI DAN ANALISIS

Pada tugas akhir ini difokuskan pada peredaman harmonisa yang terjadi dan perbaikan faktor daya pada Proyek Pakistan Deep Water Containeer Port. Simulasi pada sistem kelistrikan pada plant tersebut dilakukan untuk mengetahui kinerja sistem serta gangguan yang terjadi. Proses simulasi menggunakan *software* ETAP 11.0 dan Powersim. Setelah simulasi dijalankan maka akan didapat hasil berupa data. Data tersebut yang nantinya akan dianalisis sesuai dengan permasalahan yang terjadi. Dengan analisis tersebut diharapkan mampu menghasilkan solusi terkait permasalahan yang terjadi pada *plant* tersebut. Untuk mempermudah proses simulasi dan analisis dibuat beberapa tahapan guna mendapatkan hasil yang maksimal. Berikut adalah beberapa tahap yang perlu dilakukan dalam proses analisis.

- 1. Melakukan simulasi aliran daya pada plant tersebut.** Hal ini bertujuan untuk mengetahui nilai faktor daya. Simulasi ini nantinya akan digunakan untuk perhitungan nilai filter sehingga mampu memperbaiki kualitas faktor daya pada sistem tersebut.
- 2. Menjalankan simulasi harmonisa pada sistem kelistrikan Proyek Pakistan Deep Water Containeer Port.** Proses simulasi dilakukan terutama pada bus-bus yang terdapat sumber utama harmonisa berupa VFD. Bus-bus tersebut diantaranya : HSB-SS6-01A, HSB-SS6-01B, HSB-SS7-01A, dan HSB-SS7-01B.
- 3. Perhitungan dan pemasangan filter pada sistem.** Pemasangan filter dilakukan pada bus-bus yang merupakan sumber utama harmonisa terjadi. Karena dengan dengan pemasangan filter pada bus-bus tersebut (HSB-SS6-01A, HSB-SS6-01B, HSB-SS7-01A, dan HSB-SS7-01B) penurunan distorsi harmonisa akan lebih maksimal. Perhitungan filter selain dapat menurunkan nilai distorsi harmonisa juga dapat memperbaiki faktor daya pada plant tersebut.
- 4. Melakukan analisis perbandingan harmonisa dan faktor daya.** Analisis dilakukan pada kondisi sebelum dan sesudah pemasangan filter. Analisis perbandingan juga dilakukan ketika pemasangan filter pasif dan filter *hybrid*.

4.1 Simulasi Aliran Daya pada Sistem Kelistrikan Proyek Pakistan Deep Water Container Port

Pada tugas akhir ini, simulasi aliran daya bertujuan untuk melihat daya yang tersalur mulai dari pusat pembangkit hingga ke beban dan nilai *Power Factor* yang terdapat pada plant tersebut. Berikut adalah data hasil simulasi aliran daya pada Proyek Pakistan Deep Water Containeer Port.

Tabel 4.1 Data Hasil Simulasi Aliran Daya pada Bus Generator

ID BUS	kV	kW	kVAR	kVA	%pf
Bus 2	11	5878	5380	7968	73.8
Bus 3	11	7500	3000	8078	92.8
Bus 4	11	7500	2000	7762	96.6
Bus 5	11	1000	500	1118	89.4
Bus 31	11	1000	500	1118	89.4

Tabel 4.2 Data Hasil Simulasi Aliran Daya pada Bus Penyulang Utama (*Main Bus*)

ID BUS	kV	kW	kVAR	kVA	%pf
MV-CP-004A	11	21483	10296	23823	90.2
Bus 13	11	1392	1081	1762	79.0
Bus 14	0.4	1368	907	1641	83.3

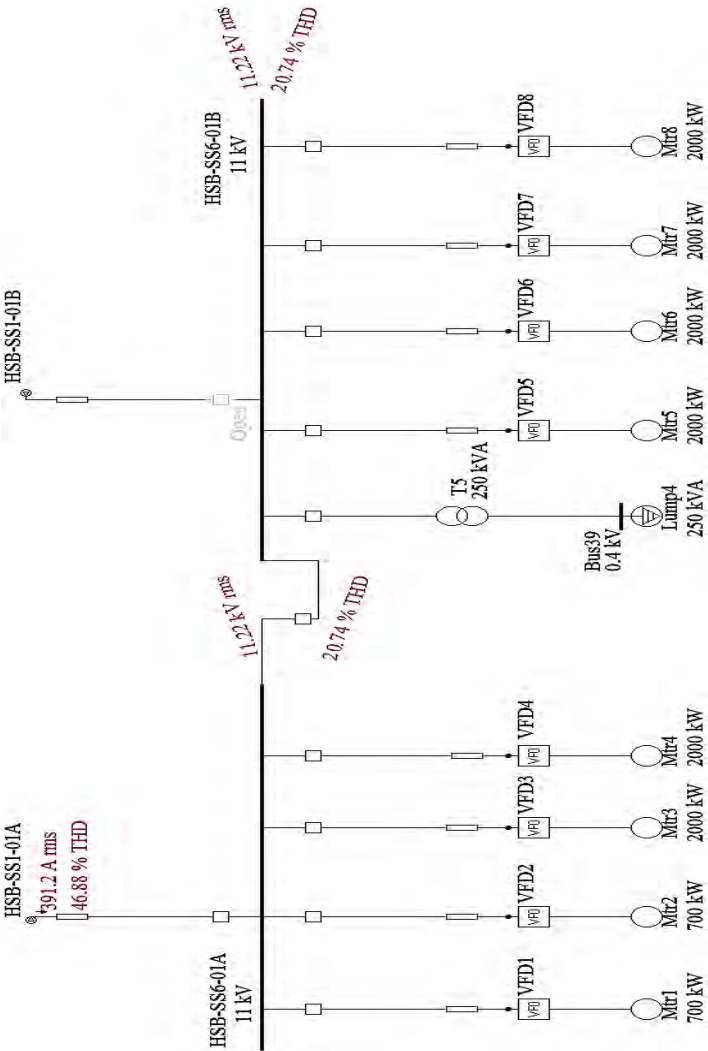
Tabel 4.3 Data Hasil Simulasi Aliran Daya pada *Network* SS-6 dan SS-7 (Bus Harmonisa)

ID BUS	kV	kW	kVAR	kVA	%pf
HSB-SS6-01A	11	6254	2534	6747	93.7
HSB-SS7-01A	11	7597	3215	8249	92.1

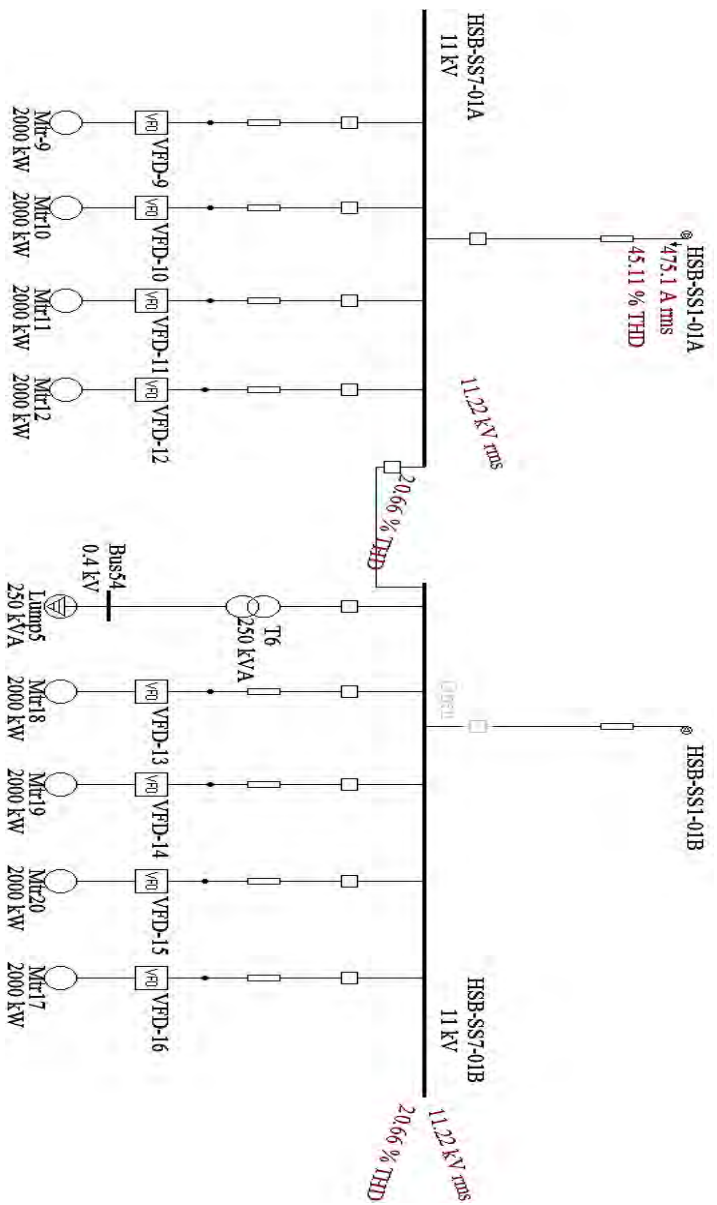
Berdasarkan data hasil simulasi aliran daya diatas, didapat nilai *Power Factor* yang beragam. *Power Factor* tertinggi mencapai nilai 93.7 yaitu pada bus HSB-SS6-01A sedangkan *Power Factor* terendah pada bus 2 yaitu bernilai 73.8. Pemasangan filter pada plant ini, selain mampu menurunkan nilai distorsi harmonik yang timbul, juga mampu untuk meningkatkan nilai *Power Factor*. Sehingga diharapkan dengan pemasangan filter nantinya, permasalahan harmonisa dan *Power Factor* dapat teratasi.

4.2 Simulasi Harmonisa pada Sistem Kelistrikan Proyek Pakistan Deep Water Container Port

Berikut adalah gambar hasil simulasi harmonisa pada *Network SS-6* dan *Network SS-7* pada kondisi awal (sebelum pemasangan filter).



Gambar 4.1 Simulasi Harmonisa pada *Network SS-6*



Gambar 4.2 Simulasi Harmonisa pada *Network SS-7*

Simulasi harmonisa difokuskan pada bus-bus yang merupakan sumber utama harmonisa, seperti pada gambar 4.1 dan 4.2 diatas. Yaitu pada bus-bus yang memiliki motor berkapasitas besar serta dikontrol menggunakan VFD. Bus-bus tersebut terdapat pada *composite network* SS-6 dan SS-7, diantaranya : HSB-SS6-01A, HSB-SS6-01B, HSB-SS7-01A, dan HSB-SS7-01B. Untuk mendapatkan hasil penurunan distorsi harmonisa yang maksimal, maka simulasi akan dilakukan dengan beberapa tahapan. Simulasi yang akan dilakukan nantinya adalah sebagai berikut :

1. Simulasi sistem kelistrikan sebelum ditambahkan filter
2. Simulasi sistem kelistrikan setelah pemasangan filter pasif
3. Simulasi sistem kelistrikan setelah pemasangan filter hybrid

Berikut adalah hasil simulasi harmonisa pada sistem kelistrikan sebelum ditambahkan filter.

Tabel 4.4 Data Hasil Simulasi Harmonisa Tanpa Filter

From Bus ID	To Bus ID	Nominal kV	THDi %	THDv %
Bus1	HSB-SS2-01B	11	11.61	20.29
Bus2	Bus9	11	19.80	20.53
Bus3	Bus10	11	19.53	20.53
Bus4	Bus11	11	20.33	20.53
Bus5	Bus12	11	29.29	20.54
Bus6	HSB-SS2-01B	11	36.40	20.29
Bus9	MV-CP-004A	11	19.80	20.54
Bus10	MV-CP-004A	11	19.53	20.54
Bus11	MV-CP-004A	11	20.33	20.54
Bus12	MV-CP-004A	11	29.29	20.54
Bus13	Bus14	11	7.95	20.54
Bus14	Bus92	0.4	8.37	14.19
Bus15	MCC-CP-006 BUS C	0.4	0.00	14.07
Bus16	MV-CP-004B	11	0.00	14.07
Bus19	Bus72	11	36.40	20.29
Bus21	Bus74	11	36.40	20.29
Bus22	HSB-SS1-01A	0.4	13.04	16.08

Tabel 4.4 Data Hasil Simulasi Harmonisa Tanpa Filter (Lanjutan)

From Bus ID	To Bus ID	Nominal kV	THDi %	THDv %
Bus23	HSB-SS1-01B	0.4	13.04	16.08
Bus25	Bus71	11	33.16	20.29
Bus26	Bus75	11	27.36	20.28
Bus28	MV-CP-004A	11	29.29	20.54
Bus31	Bus28	11	29.29	20.54
Bus33	HSB-SS6-01A	11	47.75	20.87
Bus34	HSB-SS6-01A	11	47.75	20.87
Bus35	HSB-SS6-01B	11	47.75	20.87
Bus36	HSB-SS6-01B	11	47.75	20.87
Bus37	HSB-SS6-01B	11	47.75	20.87
Bus38	HSB-SS6-01B	11	47.75	20.87
Bus39	HSB-SS6-01B	0.4	13.15	16.23
Bus40	HSB-SS2-01A	11	27.36	20.28
Bus41	Bus97	11	27.36	20.28
Bus43	HSB-SS5-01	0.4	13.99	18.20
Bus44	HSB-SS7-01A	11	47.68	20.99
Bus47	HSB-SS7-01A	11	47.76	20.68
Bus49	HSB-SS7-01A	11	47.77	20.79
Bus54	HSB-SS7-01B	0.4	13.10	16.16
Bus55	HSB-SS2-01A	11	27.36	20.28
Bus56	HSB-SS7-01A	11	47.77	20.79
Bus61	HSB-SS7-01B	11	47.77	20.78
Bus62	HSB-SS7-01B	11	47.77	20.78
Bus63	HSB-SS7-01B	11	47.77	20.78
Bus64	HSB-SS7-01B	11	47.77	20.78
Bus67	Bus1	0.4	11.91	14.52
Bus68	Bus55	0.4	27.36	13.30
Bus69	Bus40	0.4	27.36	13.30
Bus71	Bus25	0.4	33.16	15.84
Bus72	Bus19	0.4	36.40	17.27
Bus73	Bus6	0.4	36.40	17.27
Bus74	Bus21	0.4	36.40	17.27
Bus75	Bus26	0.4	27.36	13.30

Tabel 4.4 Data Hasil Simulasi Harmonisa Tanpa Filter (Lanjutan)

From Bus ID	To Bus ID	Nominal kV	THDi %	THDv %
Bus79	HSB-SS5-01	11	35.68	20.85
Bus80	HSB-SS5-01	0.4	14.21	18.02
Bus81	HSB-SS4-01	11	14.18	21.00
Bus83	HSB-SS27-01	11	31.86	20.90
Bus87	MCC-CP-006B	0.4	0.00	14.07
Bus90	HSB-SS6-01A	11	47.75	20.87
Bus91	HSB-SS6-01A	11	47.75	20.87
Bus92	MCC-CP-006A	0.4	8.37	14.07
Bus97	Bus41	0.4	27.36	13.30
HSB-SS1-01A	MV-CP-004A	11	23.05	20.56
HSB-SS1-01B	HSB-SS2-02B	11	300.07	20.56
HSB-SS1-02	HSB-SS2-01B	11	27.02	20.56
HSB-SS2-01A	HSB-SS1-01A	11	27.83	20.29
HSB-SS2-01B	HSB-SS1-02	11	27.83	20.29
HSB-SS2-02A	HSB-SS1-01A	11	0	20.59
HSB-SS2-02B	HSB-SS1-01B	11	0	20.59
HSB-SS3-01	HSB-SS1-02	11	48.35	20.76
HSB-SS4-01	Bus81	11	23.38	20.95
HSB-SS5-01	HSB-SS1-01A	11	13.82	20.68
HSB-SS6-01A	HSB-SS1-01A	11	46.84	20.74
HSB-SS6-01B	HSB-SS6-01A	11	44.94	20.74
HSB-SS7-01A	HSB-SS1-01A	11	45.04	20.66
HSB-SS7-01B	HSB-SS7-01A	11	44.96	20.66
HSB-SS27-01	Bus83	11	18.12	20.98
MCC-1P-007	MCC-CP-006A	0.4	7.70	13.91
MCC-2CP-007 (ENGINE-2).	MCC-CP-006A	0.4	7.86	13.91
MCC-3CP-007 (ENGINE-3).	MCC-CP-006A	0.4	7.86	13.91
MCC-CP-006A	MCC-1P-007	0.4	7.70	14.07
MCC-CP-006B	MCC-CP-006A	0.4	26.45	14.07
MCC-CP-006C	MCC-CP-006B	0.4	9.93	14.07

Tabel 4.4 Data Hasil Simulasi Harmonisa Tanpa Filter (Lanjutan)

From Bus ID	To Bus ID	Nominal kV	THDi %	THDv %
MCC-CP-008	MCC-CP-006A	0.4	7.85	14.07
MV-CP-004A	HSB-SS1-01A	11	23.05	20.54
MV-CP-004B	Bus16	11	0	14.07
Cable61~	MCC-CP-006 BUS C	0.4	0	14.07
Cable62~	MCC-CP-006 BUS C	0.4	0	14.07
Cable63~	MCC-CP-006 BUS C	0.4	0	14.07
Cable12~	HSB-SS1-01B	11	0	20.56
Cable23~	HSB-SS1-01B	11	0	20.56

Berdasarkan hasil simulasi harmonisa tanpa filter, didapatkan hampir seluruh bus yang ada pada plant tersebut memiliki tingkat harmonisa yang melebihi batas dari standar yang telah ditetapkan oleh IEEE.

4.2.1 Distorsi Harmonisa Terhadap Tegangan

Nilai batas yang telah ditetapkan oleh standar IEEE 519-1992 mengenai harmonisa adalah maksimal sebesar 5% untuk nilai *Total Harmonic Distortion* (THDv) dan maksimal 3% untuk nilai *Individual Harmonic Distortion* (IHDv) pada level tegangan dibawah 69 kV. Untuk lebih jelasnya, regulasi tersebut dapat dilihat pada tabel 4.2 berikut :

Tabel 4.5 Batas Nilai Harmonisa Tegangan Sesuai IEEE STD 519-1992

Tegangan Bus Pada PCC	Distorsi Tegangan Individual (%)	THD (%)
69 kV dan ke bawah	3	5
69,001 kV sampai 161 kV	1,5	2,5
161,001 kV dan ke atas	1	1,5

Pembahasan selanjutnya mengenai harmonisa tegangan akan terkonsentrasi pada bus-bus yang ada pada *network* SS-6 dan SS-7.

4.2.1.1 Harmonisa Tegangan pada Network SS-6

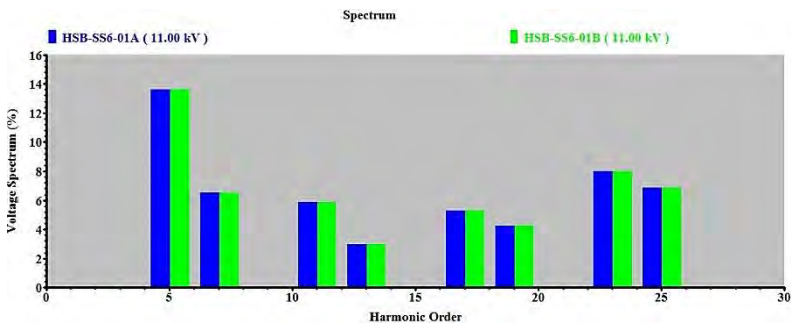
Pada *network* SS-6 ini, dibahas mengenai pengaruh distorsi harmonisa tegangan yang disebabkan oleh penggunaan beban motor yang dilengkapi VFD pada bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS6-01B. Berikut adalah data yang didapat dari hasil simulasi harmonisa tegangan pada kedua bus tersebut.

Tabel 4.6 Persentase Harmonisa Terhadap Tegangan Fundamental di Orde Tertentu pada bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS6-01B

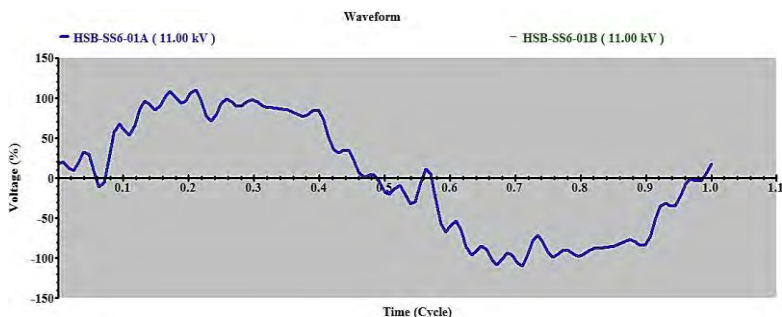
BUS ID	kV	THD _v (%)	ORDE (%)							
			5	7	11	13	17	19	23	25
HSB-SS6-01A	11.22	20.74	13.6	6.52	5.91	2.96	5.31	4.26	8.02	6.88
HSB-SS6-01B	11.22	20.74	13.6	6.52	5.91	2.96	5.31	4.26	8.02	6.88

Berdasarkan tabel 4.3 di atas, terjadi kenaikan pada tegangan nominal. Pada awalnya tegangan bus terukur 11 kV dan akibat harmonisa tegangan bus naik menjadi 11,22 kV. Nilai THD_v juga jauh melebihi standar yang ditetapkan IEEE. Standar yang sesuai untuk tegangan 11 kV untuk THD_v adalah sebesar 5% sedangkan pada plant sebesar 20.74%. Nilai individual harmonik pada orde tertentu juga semua dalam kondisi melebihi batas yang ditetapkan yaitu sebesar 3%.

Berikut adalah gambar diagram dan gelombang distorsi harmonisa yang terjadi pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS6-01B akibat adanya pembebanan berupa motor dengan VFD pada Proyek Pakistan Deep Water Container Port.



Gambar 4.3 Diagram Harmonisa Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS6-01B



Gambar 4.4 Gelombang Harmonisa Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS6-01B

Gambar diagram 4.3 menunjukkan orde dan besar distorsi harmonisa yang timbul pada bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS6-01B. Berdasarkan hasil simulasi, orde harmonisa tertinggi yang muncul adalah orde kelima dan kedua puluh tiga. Sedangkan pada gambar 4.4 merupakan gelombang dari sistem yang telah terdistorsi oleh harmonisa. Bentuk awal gelombang yang berupa sinusoidal murni menjadi tidak berbentuk sinusoidal lagi. Bentuk gelombang atau sinyal yang telah terdistorsi harmonisa tersebut sangat berbahaya bagi peralatan tenaga listrik yang sensitif. Karena dapat mengakibatkan kerusakan serta terjadi salah pembacaan (*missreading*) pada peralatan.

4.2.1.2 Harmonisa Tegangan pada Network SS-7

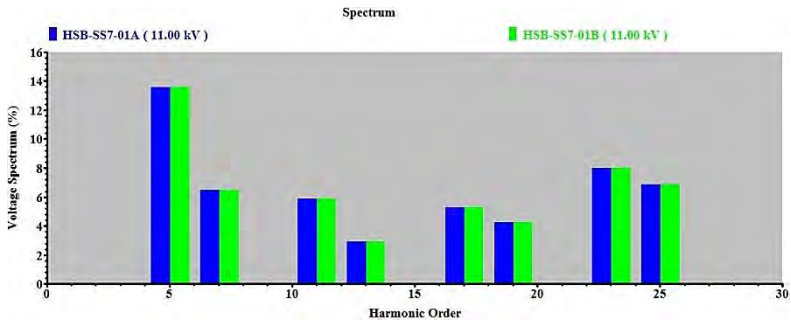
Pada network SS7, simulasi harmonisa dilakukan pada bus HSB-SS7-01A dan HSB-SS7-01B. Berikut adalah data yang didapat dari hasil simulasi harmonisa tegangan pada kedua bus tersebut.

Tabel 4.7 Persentase Harmonisa Terhadap Tegangan Fundamental di Orde Tertentu pada bus HSB-SS7-01A dan HSB-SS7-01B

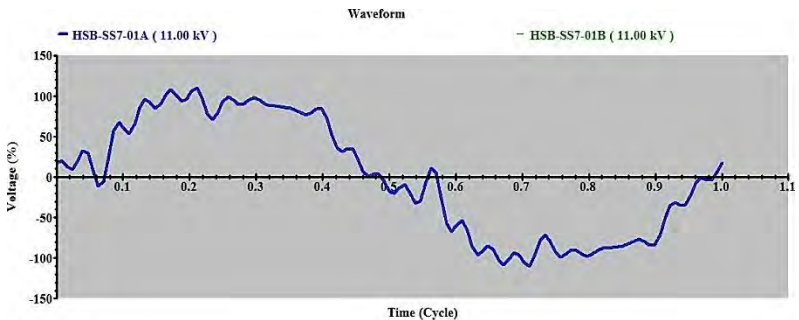
BUS ID	kV	THD _v (%)	ORDE (%)							
			5	7	11	13	17	19	23	25
HSB-SS7-01A	11.22	20.66	13.55	6.50	5.88	2.95	5.29	4.24	7.99	6.87
HSB-SS7-01B	11.22	20.66	13.55	6.50	5.88	2.95	5.29	4.24	7.99	6.87

Dari tabel 4.4 diatas dapat dilihat bahwa orde tertinggi yang muncul adalah orde kelima diikuti oleh orde kedua puluh tiga. Orde

frekuensi yang dominan muncul identik dengan bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS6-01B dikarenakan kedua bus ini memiliki jenis VFD serta pembebanan yang hampir sama dengan yang terdapat pada bus HSB-SS7-01A dan HSB-SS7-01B ini. Berikut adalah gambar diagram dan gelombang distorsi harmonisa yang terjadi pada bus HSB-SS7-01A dan HSB-SS7-01B.



Gambar 4.5 Diagram Harmonisa Tegangan pada Bus HSB-SS7-01A dan HSB-SS7-01B



Gambar 4.6 Gelombang Harmonisa Tegangan pada Bus HSB-SS7-01A dan HSB-SS7-01B

Bentuk diagram serta gelombang pada bus HSB-SS7-01A dan HSB-SS7-01B memiliki bentuk yang hampir sama (identik) dengan bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS6-01B sehingga dapat disimpulkan bahwa bentuk diagram serta gelombang kedua bus tersebut identik dikarenakan adanya kapasitas pembebanan yang hampir sama dan penggunaan VFD yang sejenis.

4.2.2 Distorsi Harmonisa Terhadap Arus

Pada *plant* Pakistan Deep Water Containeer Port, simulasi harmonisa terhadap arus juga difokuskan pada bus-bus yang terdapat di dalam *composite network* SS-6 dan SS-7. Untuk menganalisa nilai harmonisa arus agar sesuai dengan standar IEEE, perlu dilakukan perhitungan I_{SC}/I_L . I_{SC} merupakan arus hubung singkat maksimum sedangkan I_L adalah arus pembebanan maksimum. Untuk mengetahui nilai I_{SC} dan I_L didapat melalui simulasi aliran daya (*Load Flow*) pada bus yang tempat sumber utama harmonisa pada *plant* tersebut. Untuk memperjelas regulasi mengenai standar harmonisa arus pada IEEE, dapat dilihat sesuai tabel di bawah ini.

Tabel 4.8 Batas Nilai Harmonisa Arus Sesuai IEEE STD 519-1992

Distorsi Harmonisa Arus Maksimum dalam Persen terhadap I_L						
I_{SC}/I_L	Orde Harmonisa Individual (Harmonisa Orde Ganjil)					
	<11	$11 \leq h \leq 17$	$17 \leq h \leq 23$	$23 \leq h \leq 35$	$35 \leq h$	TDD
<20*	4	2	1,5	0,6	0,3	5
20-50	7	3,5	2,5	1	0,5	8
50-100	10	4,5	4	1,5	0,7	12
100-1000	12	5,5	5	2	1	15
>1000	15	7	6	2,5	1,4	20
Harmonisa orde genap dibatasi 25% dari Harmonisa orde ganjil di atas.						
Tidak diperbolehkan distorsi arus yang dihasilkan sistem DC, contohnya converter setengah gelombang.						
*Semua peralatan pembangkit listrik terbatas pada nilai-nilai distorsi arus terlepas dari I_{SC}/I_L aktual.						
dimana :						
I_{SC} = Arus hubung singkat maksimum pada PCC						
I_L = Arus beban maksimum (komponen frekuensi fundamental) pada PCC						

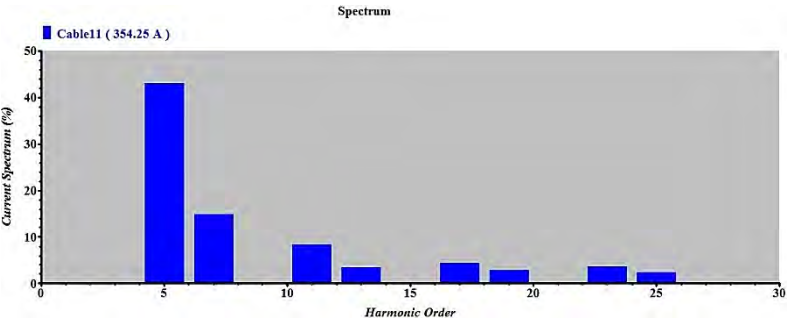
4.2.2.1 Harmonisa Arus pada Network SS-6

Untuk melihat besarnya nilai harmonisa arus yang terjadi pada pada *network* ini, dilakukan simulasi harmonisa. Pada simulasi tersebut yang dipilih atau diplot adalah kabel 11 yang merupakan sumber input dari bus HSB-SS6-01A. Berikut adalah data hasil simulasi tersebut.

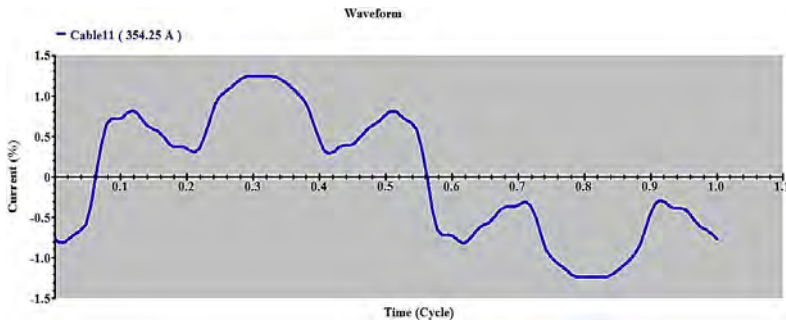
Tabel 4.9 Persentase Harmonisa Terhadap Arus Fundamental Orde Tertentu pada *cable* 11

ID	Arus (A)	THDi (%)	ORDE (%)							
			5	7	11	13	17	19	23	25
cable 11	354.2	46.88	42.99	14.8	8.45	3.51	4.4	2.91	3.57	2.41

Berdasarkan hasil simulasi *Load Flow* pada *network* SS-6 didapatkan nilai I_{sc} sebesar 22.45 kA. Untuk nilai I_L didapat 354.12 A. Untuk mengetahui standar harmonisa untuk arus perlu perhitungan I_{sc}/I_L , hasil perhitungan tersebut mendapatkan nilai sebesar 63.4 A. Selanjutnya, hasil perhitungan tersebut I_{sc}/I_L dibuat sebagai referensi untuk penentuan standar harmonisa sesuai tabel 4.5. Berdasarkan tabel 4.5 didapatkan batas maksimal untuk *Total Harmonic Distortion* (THDi) sebesar 12%. Hasil simulasi harmonisa arus menunjukkan bahwa nilai THDi melewati batas yang telah ditentukan. Untuk nilai individual harmonik per-orde juga banyak yang melewati batas. Sesuai dengan tabel 4.6 didapatkan nilai orde harmonisa tertinggi adalah pada orde kelima dan orde ketujuh. Berikut adalah bentuk diagram dan gelombang dari hasil simulasi yang dilakukan pada *cable* 11.



Gambar 4.7 Diagram Harmonisa Arus pada Bus *Cable* 11



Gambar 4.8 Gelombang Harmonisa Arus pada Bus *Cable 11*

Bentuk gelombang distorsi arus harmonisa yang terjadi pada *Cable 11* memiliki karakteristik bentuk yang hampir sama dengan bentuk gelombang dari VFD yang terpasang pada bus tersebut. Bentuk gelombang juga memiliki *ripple* yang cukup besar dan sudah tidak berbentuk sinusoidal lagi. Hal tersebut tentu sangat berbahaya bagi peralatan yang beroperasi pada sistem tersebut.

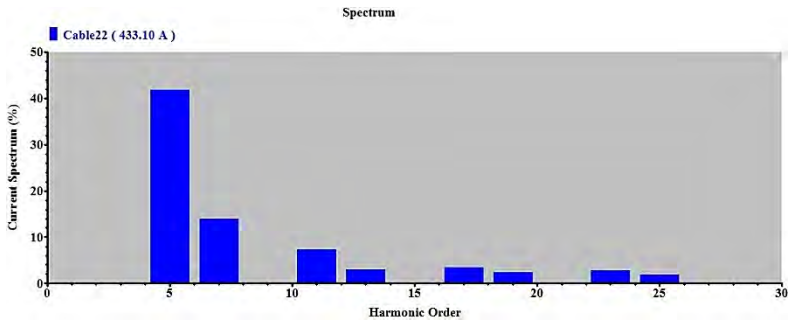
4.2.2.2 Harmonisa Arus pada Network SS-7

Pada *network SS-7*, harmonisa arus didapatkan melalui simulasi dengan memplot *cable 22* yang merupakan sumber input dari bus HSB-SS7-01A. Berikut adalah data hasil simulasi tersebut.

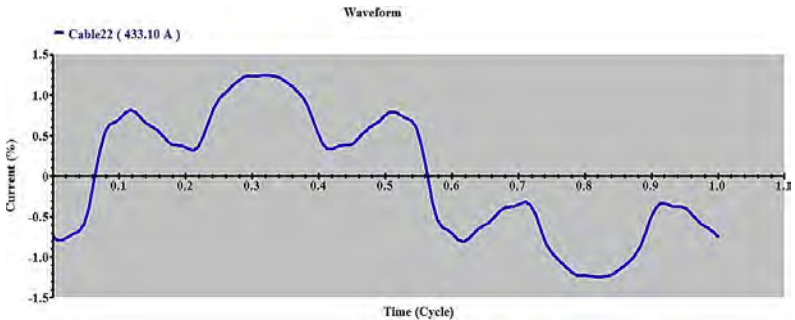
Tabel 4.10 Persentase Harmonisa Terhadap Arus Fundamental Orde Tertentu pada *cable 22*

ID	Arus (A)	THDi (%)	ORDE (%)							
			5	7	11	13	17	19	23	25
cable 22	354.2	46.88	42.99	14.8	8.45	3.51	4.4	2.91	3.57	2.41

Seperti pada *network SS-6*, untuk mengetahui batas nilai harmonisa arus yang diizinkan perlu dilakukan simulasi *Load Flow* untuk mendapatkan nilai I_{sc} dan I_L . Berdasarkan hasil simulasi didapatkan nilai I_{sc} sebesar 16.6 kA dan nilai I_L sebesar 432 A. Sehingga sesuai perhitungan didapatkan nilai I_{sc}/I_L sebesar 38.43 A. Berdasarkan tabel 4.5 didapatkan nilai batas THDi sebesar 8%. Menurut tabel 4.7 dapat disimpulkan bahwa nilai THDi dan individual harmonik per-orde pada *cable 22* telah melewati batas yang ditentukan.



Gambar 4.9 Diagram Harmonisa Arus pada Bus *Cable 22*



Gambar 4.10 Gelombang Harmonisa Arus pada Bus *Cable 22*

Bentuk diagram serta gelombang hasil simulasi harmonisa pada *Cable 22* memiliki bentuk yang hampir sama (identik) dengan *Cable 11*, dikarenakan adanya kapasitas pembebanan yang hampir sama dan penggunaan VFD yang sejenis.

4.3 Pemasangan dan Perhitungan Spesifikasi Filter Pasif

Pada tugas akhir ini, untuk mengatasi harmonisa yang terjadi pada Proyek Pakistan Deep Water Container Port dilakukan pemasangan filter pasif. Filter tersebut dipasang pada bus-bus yang terdapat motor berkapasitas besar yang kecepatannya diatur menggunakan VFD. Bus tersebut diantaranya : HSB-SS6-01A, HSB-SS6-01B, HSB-SS7-01A, dan HSB-SS7-01B. Penentuan filter disesuaikan dengan orde harmonisa yang timbul pada bus tersebut. Perhitungan filter selain bertujuan untuk penurunan distorsi harmonisa juga sebagai perbaikan faktor daya yang ada pada *plant* tersebut.

4.3.1 Perhitungan dan Pemasangan Filter Pasif Orde 5 pada *Network* SS-6

Proses filterisasi dimulai pada bus yang memiliki tingkat harmonisa terbesar. Berdasarkan simulasi harmonisa, orde 5 merupakan orde yang memiliki tingkat distorsi harmonisa terbesar. Berikut adalah perhitungan spesifikasi dari filter orde 5 :

$$\text{kVAR} = 1787 \quad (4.1)$$

$$C = \frac{\text{kVAR}}{\omega_0 \times V_{LL}^2} \quad (4.2)$$

$$C = \frac{1787}{(2\pi \times 50) \times (11)^2} = 47.01 \mu\text{F} \quad (4.3)$$

$$L = \frac{1}{(2\pi \times 50 \times 5)^2 \times 47.01 \times 10^{-6}} = 8.6299 \times 10^{-3} \text{H} \quad (4.4)$$

$$X_L = 2\pi \times 50 \times 8.6299 \times 10^{-3} = 2.7098 \Omega \quad (4.5)$$

$$Q_{\text{faktor}} = 30 \quad (4.6)$$

$$R = \frac{2.7098}{30} = 0.0903 \Omega \quad (4.7)$$

Nilai kVAR yang dimasukkan ke dalam perhitungan adalah sesuai dengan faktor daya yang akan dicapai. Target faktor daya pada sistem ini adalah 1. Q_{faktor} bernilai antara 30 sampai 60. Fungsi dari Q_{faktor} atau biasa disebut faktor kualitas adalah untuk menentukan ketajaman dalam proses *filtering*. Besar kecilnya nilai Q_{faktor} mempengaruhi *bandwith* dari sinyal yang akan di filter. Hasil yang didapat pada proses *filtering* orde 5 ini, yaitu terjadi penurunan distorsi harmonisa yang cukup signifikan pada orde tersebut. Sedangkan untuk distorsi harmonisa yang terjadi pada orde lainnya masih cukuplah tinggi. Sehingga perlu dipasang filter kembali yang sesuai dengan orde harmonisa yang timbul. Berikut ditampilkan data persentase harmonisa pada bus dan kabel setelah pemasangan filter orde 5 pada *network* SS-6.

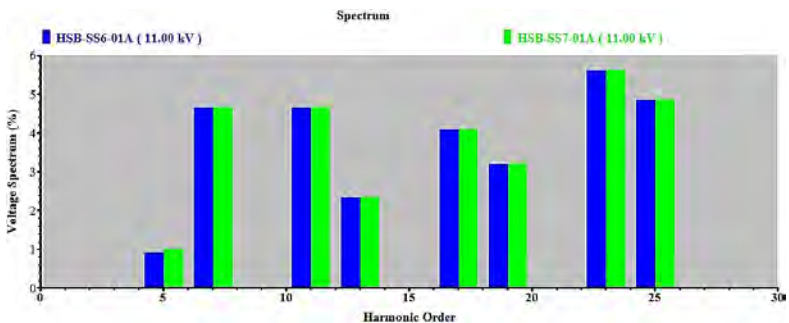
Tabel 4.11 Persentase Harmonisa Terhadap Tegangan Fundamental pada Orde Tertentu Setelah Pemasangan Filter Orde 5

BUS ID	kV	THD _v (%)	ORDE (%)							
			5	7	11	13	17	19	23	25
HSB-SS6-01A	11.06	11.47	0.92	4.64	4.65	2.34	4.09	3.20	5.60	4.84
HSB-SS6-01B	11.06	11.47	0.92	4.64	4.65	2.34	4.09	3.20	5.60	4.84
HSB-SS7-01A	11.06	11.48	1.01	4.65	4.65	2.33	4.08	3.20	5.60	4.85
HSB-SS7-01B	11.06	11.48	1.01	4.65	4.65	2.33	4.08	3.20	5.60	4.85

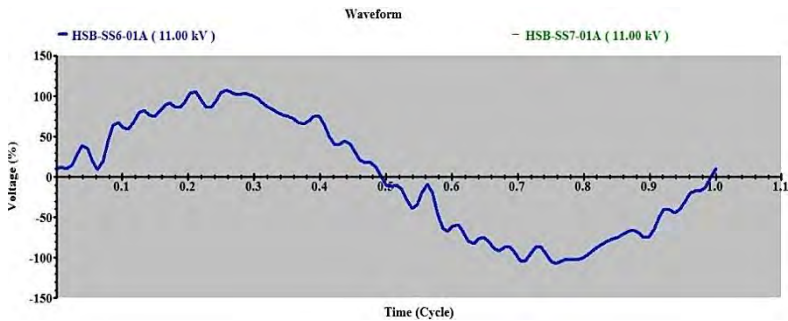
Tabel 4.12 Persentase Harmonisa Terhadap Arus Fundamental pada Orde Tertentu Setelah Pemasangan Filter Orde 5

ID	Arus (A)	THDi (%)	ORDE (%)							
			5	7	11	13	17	19	23	25
Cable 11	373.7	52.81	51.96	6.37	5.30	2.26	2.77	1.75	1.83	1.17
Cable 22	474.4	44.69	41.44	13.86	7.26	2.88	3.37	2.19	2.65	1.86

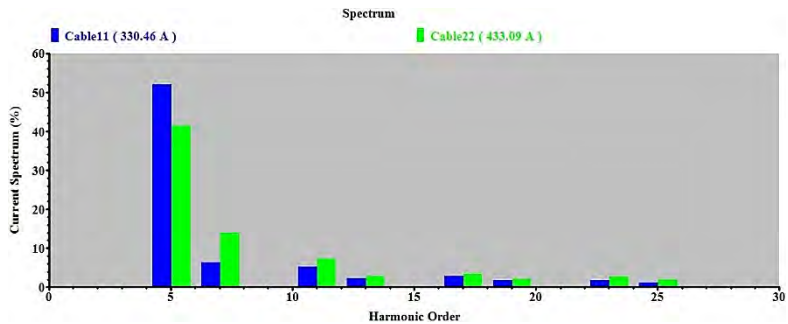
Pada tabel 4.11 dan 4.12 diatas terlihat bahwa distorsi harmonisa individual tegangan pada orde 5 telah memenuhi standar yang ditentukan. Namun untuk orde 7 dan seterusnya masih melebihi batas yang ditentukan. Sedangkan untuk harmonisa arus nilai THDi dan individual harmonik pada semua orde masih melebihi dari batas yang ditentukan. Oleh karena itu perlu pemasangan kembali filter pada orde selanjutnya.



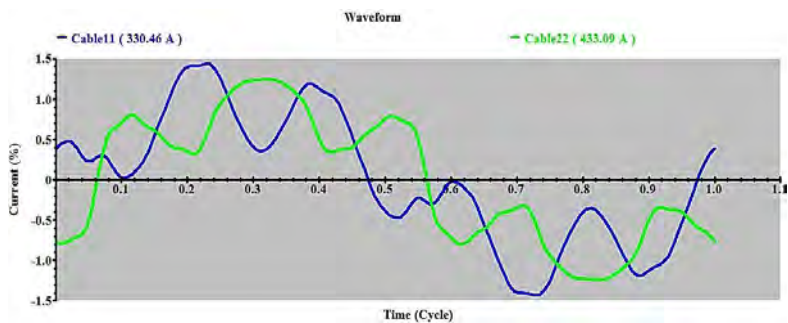
Gambar 4.11 Diagram Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 5



Gambar 4.12 Gelombang Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 5



Gambar 4.13 Diagram Arus pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 5



Gambar 4.14 Gelombang Arus pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 5

Berdasarkan gambar 4.12 dan 4.14, Bentuk gelombang tegangan sistem masih menunjukkan adanya *ripple* dan belum berbentuk sinus murni. Sedangkan pada gelombang arus belum menunjukkan adanya perubahan yang berarti dan masih terjadi distorsi yang cukup besar.

4.3.2 Perhitungan dan Pemasangan Filter Pasif Orde 7 pada *Network SS-6*

$$kVAR = 213 \quad (4.8)$$

$$C = \frac{kVAR}{\omega_0 \times V_{LL}^2} \quad (4.9)$$

$$C = \frac{213}{(2\pi \times 50) \times (11)^2} = 5.603 \mu F \quad (4.10)$$

$$L = \frac{1}{(2\pi \times 50 \times 7)^2 \times 5.603 \times 10^{-6}} = 3.694 \times 10^{-2} H \quad (4.11)$$

$$X_L = 2\pi \times 50 \times 8.6299 \times 10^{-2} = 11.5998 \Omega \quad (4.12)$$

$$Q_{factor} = 30 \quad (4.13)$$

$$R = \frac{11.5998}{30} = 0.3866 \Omega \quad (4.14)$$

Berikut ditampilkan data persentase harmonisa pada bus dan kabel setelah pemasangan filter orde 7 pada *network SS-6*.

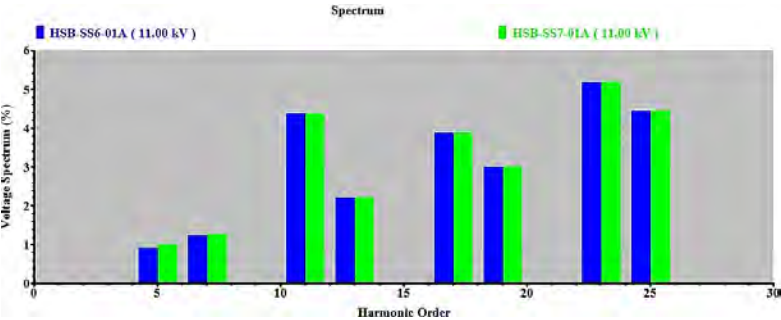
Tabel 4.13 Persentase Harmonisa Terhadap Tegangan Fundamental pada Orde Tertentu Setelah Pemasangan Filter Orde 7

BUS ID	kV	THD _v (%)	ORDE (%)							
			5	7	11	13	17	19	23	25
HSB-SS6-01A	11.04	9.85	0.92	1.23	4.36	2.20	3.86	3.01	5.19	4.44
HSB-SS6-01B	11.04	9.85	0.92	1.23	4.36	2.20	3.86	3.01	5.19	4.44
HSB-SS7-01A	11.05	9.86	1.00	1.26	4.36	2.20	3.86	3.01	5.19	4.45
HSB-SS7-01B	11.05	9.86	1.00	1.26	4.36	2.20	3.86	3.01	5.19	4.45

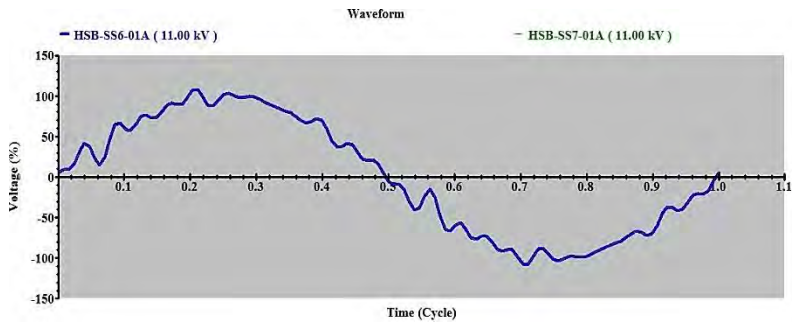
Tabel 4.14 Persentase Harmonisa Terhadap Arus Fundamental pada Orde Tertentu Setelah Pemasangan Filter Orde 7

ID	Arus (A)	THDi (%)	ORDE (%)							
			5	7	11	13	17	19	23	25
Cable 11	375.6	54.74	52.13	15.59	4.45	1.95	2.41	1.51	1.51	0.95
Cable 22	474.2	44.62	41.44	13.66	7.24	2.87	3.34	2.17	2.60	1.82

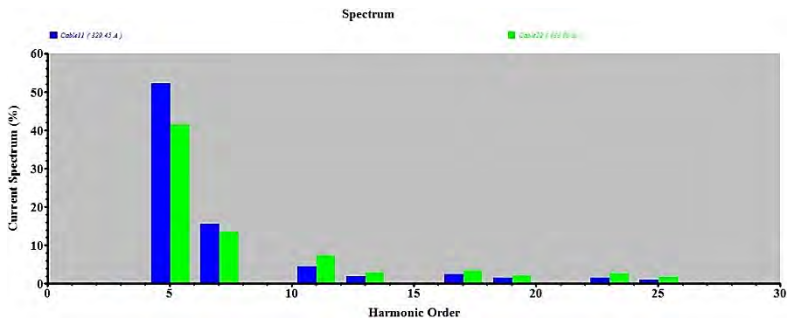
Hasil yang diperoleh berdasarkan tabel 4.13 dan 4.14 diatas menunjukkan terjadi penurunan nilai THDv yang cukup signifikan. Selain itu, nilai individual harmonisa tegangan pada orde 7 juga telah memenuhi standar yang ditentukan. Namun pada orde 11 dan seterusnya, nilai individual harmonisa tegangan masih melebihi batas yang ditentukan. Sedangkan untuk harmonisa arus nilai THDi dan individual harmonik pada semua orde masih melebihi dari batas yang ditentukan. Oleh karena itu perlu pemasangan kembali filter pada orde selanjutnya. Berikut adalah gambar diagram dan bentuk gelombang hasil proses *filtering* pada orde 7.



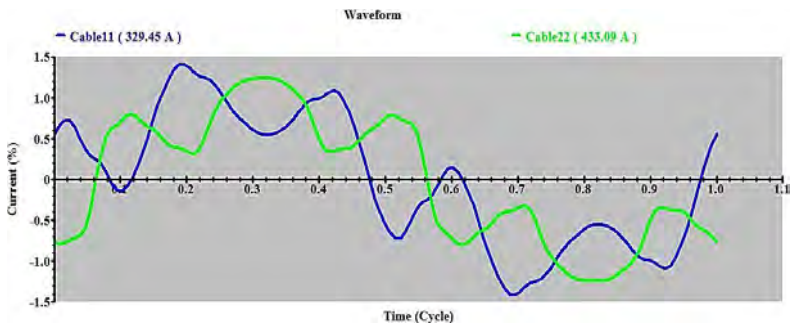
Gambar 4.15 Diagram Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 7



Gambar 4.16 Gelombang Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 7



Gambar 4.17 Gelombang Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 7



Gambar 4.18 Gelombang Arus pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 7

Pada gambar 4.16 menunjukkan bentuk gelombang tegangan yang terdistorsi sudah mulai kembali berbentuk sinusoidal namun masih terdapat *ripple*. Sedangkan pada gambar 4.17 dan 4.18 terlihat bahwa distorsi harmonisa arus didominasi oleh orde kelima dan ketujuh.

4.3.3 Perhitungan dan Pemasangan Filter Pasif Orde 11 pada Network SS-6

$$kVAR = 259 \quad (4.15)$$

$$C = \frac{kVAR}{\omega_0 \times V_{LL}^2} \quad (4.16)$$

$$C = \frac{259}{(2\pi \times 50) \times (11)^2} = 6.813 \mu F \quad (4.17)$$

$$L = \frac{1}{(2\pi \times 50 \times 11)^2 \times 6.813 \times 10^{-6}} = 1.2303 \times 10^{-2} H \quad (4.18)$$

$$X_L = 2\pi \times 50 \times 1.2303 \times 10^{-2} = 3.8631 \Omega \quad (4.19)$$

$$Q_{factor} = 30 \quad (4.20)$$

$$R = \frac{3.8631}{30} = 0.1287 \Omega \quad (4.21)$$

Berikut ditampilkan data persentase harmonisa pada bus dan kabel setelah pemasangan filter orde 11 pada *network* SS-6.

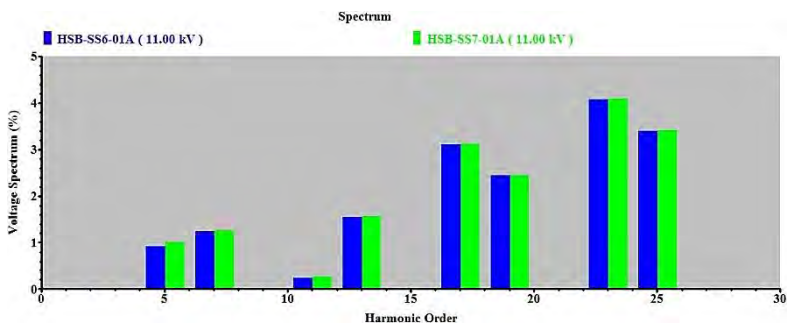
Tabel 4.15 Persentase Harmonisa Terhadap Tegangan Fundamental pada Orde Tertentu Setelah Pemasangan Filter Orde 11

BUS ID	kV	THD _v (%)	ORDE (%)							
			5	7	11	13	17	19	23	25
HSB-SS6-01A	11.02	6.97	0.92	1.23	0.23	1.55	3.11	2.43	4.10	3.40
HSB-SS6-01B	11.02	6.97	0.92	1.23	0.23	1.55	3.11	2.43	4.10	3.40
HSB-SS7-01A	11.02	7.01	1.00	1.26	0.26	1.56	3.12	2.44	4.10	3.41
HSB-SS7-01B	11.02	7.01	1.00	1.26	0.26	1.56	3.12	2.44	4.10	3.41

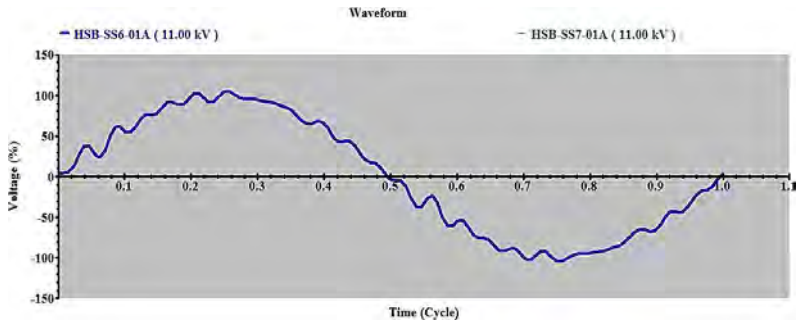
Tabel 4.16 Persentase Harmonisa Terhadap Arus Fundamental pada Orde Tertentu Setelah Pemasangan Filter Orde 11

ID	Arus (A)	THDi (%)	ORDE (%)							
			5	7	11	13	17	19	23	25
Cable 11	375.7	55.31	52.26	15.73	8.74	0.56	1.26	0.80	0.74	0.49
Cable 22	474.1	44.54	41.44	13.66	6.94	2.82	3.27	2.10	2.47	1.71

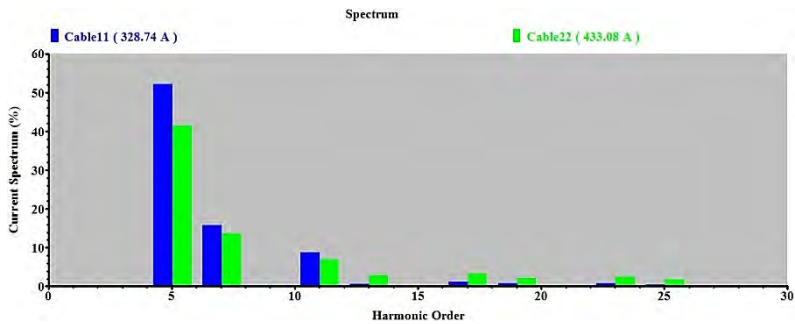
Pada tabel 4.15 dan 4.16 diatas terlihat bahwa distorsi harmonisa individual tegangan pada orde 11 telah memenuhi standar yang ditentukan. Namun untuk individual tegangan pada orde 17 dan seterusnya masih melebihi batas yang ditentukan. Sedangkan untuk harmonisa arus nilai THDi dan individual harmonik pada semua orde masih melebihi dari batas yang ditentukan. Oleh karena itu perlu pemasangan kembali filter pada orde selanjutnya. Berikut adalah gambar diagram dan bentuk gelombang hasil proses *filtering* pada orde 11.



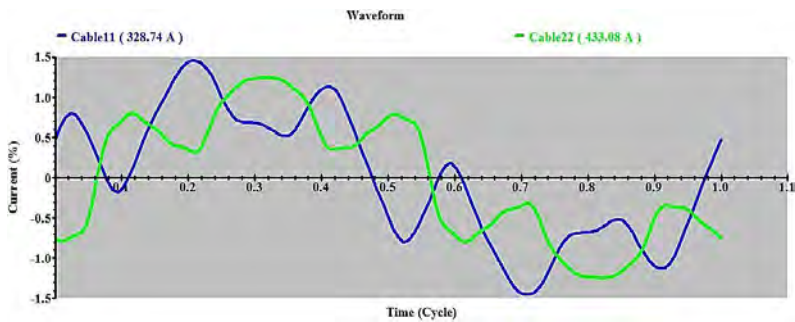
Gambar 4.19 Diagram Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 11



Gambar 4.20 Gelombang Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 11



Gambar 4.21 Gelombang Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 11



Gambar 4.22 Gelombang Arus pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 11

Berdasarkan gambar 4.19 dan 4.20, Bentuk gelombang tegangan sistem semakin menuju ke bentuk sinusoidal. Sedangkan pada gelombang arus belum menunjukkan adanya perubahan yang berarti dan masih terjadi distorsi harmonisa yang cukup besar.

4.3.4 Perhitungan dan Pemasangan Filter Pasif Orde 17 pada *Network SS-6*

$$\text{kVAR} = 46 \quad (4.22)$$

$$C = \frac{\text{kVAR}}{\omega_0 \times V_{LL}^2} \quad (4.23)$$

$$C = \frac{46}{(2\pi \times 50 \times 11)^2} = 1.21 \mu\text{F} \quad (4.24)$$

$$L = \frac{1}{(2\pi \times 50 \times 17)^2 \times 1.21 \times 10^{-6}} = 2.9003 \times 10^{-2} \text{ H} \quad (4.25)$$

$$X_L = 2\pi \times 50 \times 2.9003 \times 10^{-2} = 9.1072 \Omega \quad (4.26)$$

$$Q_{\text{factor}} = 30 \quad (4.27)$$

$$R = \frac{9.1072}{30} = 0.3035 \Omega \quad (4.28)$$

Berikut ditampilkan data persentase harmonisa pada bus dan kabel setelah pemasangan filter orde 17 pada *network SS-6*.

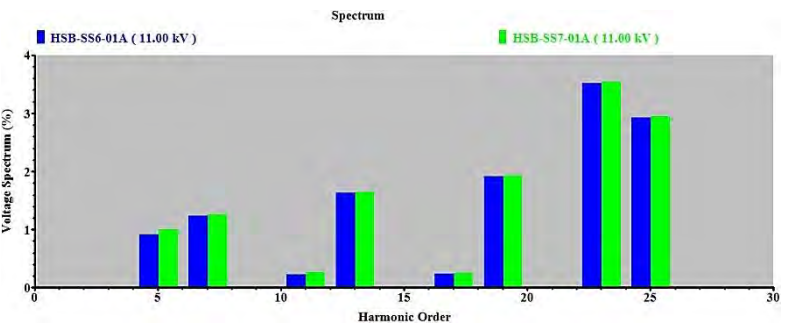
Tabel 4.17 Persentase Harmonisa Terhadap Tegangan Fundamental pada Orde Tertentu Setelah Pemasangan Filter Orde 17

BUS ID	kV	THD _v (%)	ORDE (%)							
			5	7	11	13	17	19	23	25
HSB-SS6-01A	11.01	5.46	0.92	1.23	0.23	1.63	0.24	1.91	3.52	2.93
HSB-SS6-01B	11.01	5.46	0.92	1.23	0.23	1.63	0.24	1.91	3.52	2.93
HSB-SS7-01A	11.01	5.51	1.00	1.26	0.26	1.64	0.26	1.92	3.53	2.94
HSB-SS7-01B	11.01	5.51	1.00	1.26	0.26	1.64	0.26	1.92	3.53	2.94

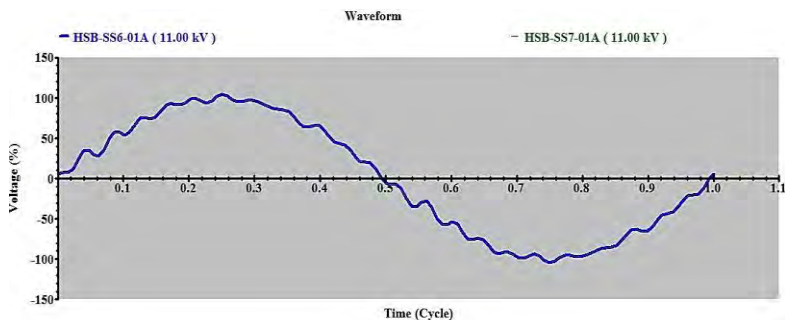
Tabel 4.18 Persentase Harmonisa Terhadap Arus Fundamental pada Orde Tertentu Setelah Pemasangan Filter Orde 17

ID	Arus (A)	THDi (%)	ORDE (%)							
			5	7	11	13	17	19	23	25
Cable 11	375.8	55.42	52.28	15.74	8.75	0.68	3.62	0.33	0.48	0.43
Cable 22	474.0	44.51	41.44	13.66	6.94	2.83	2.93	2.04	2.40	1.65

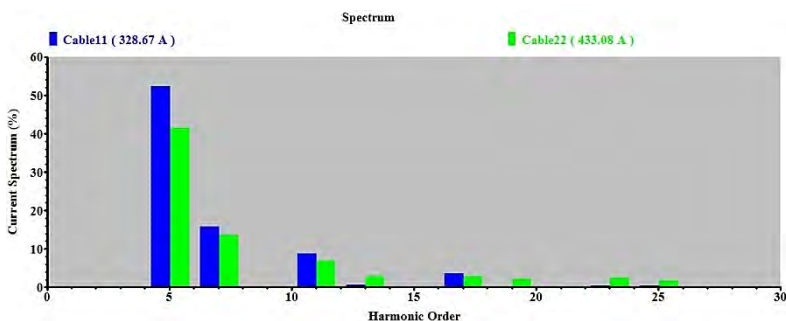
Hasil yang diperoleh berdasarkan tabel 4.17 dan 4.18 diatas menunjukkan terjadi penurunan nilai THDv yang cukup signifikan. Selain itu, nilai individual harmonisa tegangan pada orde 17 juga telah memenuhi standar yang ditentukan. Namun pada orde 23 dan seterusnya, nilai individual harmonisa tegangan masih melebihi batas yang ditentukan. Sedangkan untuk harmonisa arus nilai THDi dan individual harmonik pada semua orde masih melebihi dari batas yang ditentukan. Oleh karena itu perlu pemasangan kembali filter pada orde selanjutnya. Berikut adalah gambar diagram dan bentuk gelombang hasil proses *filtering* pada orde 17.



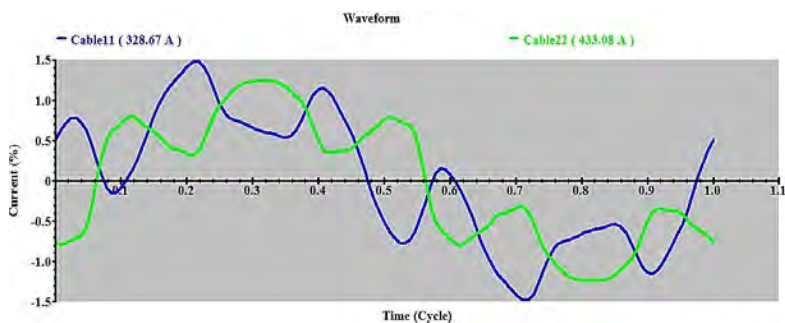
Gambar 4.23 Diagram Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 17



Gambar 4.24 Gelombang Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 17



Gambar 4.25 Gelombang Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 17



Gambar 4.26 Gelombang Arus pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 17

Pada gambar 4.24 menunjukkan bentuk gelombang tegangan yang terdistorsi sudah semakin *smooth* namun masih terdapat sedikit *ripple*. Sedangkan pada gambar 4.25 dan 4.26 terlihat bahwa distorsi harmonisa arus didominasi oleh orde kelima dan ketujuh.

4.3.5 Perhitungan dan Pemasangan Filter Pasif Orde 23 pada Network SS-6

$$\text{kVAR} = 38 \quad (4.29)$$

$$C = \frac{\text{kVAR}}{\omega_0 \times V_{LL}^2} \quad (4.30)$$

$$C = \frac{38}{(2\pi \times 50) \times (11)^2} = 1 \mu\text{F} \quad (4.31)$$

$$L = \frac{1}{(2\pi \times 50 \times 23)^2 \times 1 \times 10^{-6}} = 1.9172 \times 10^{-2} \text{ H} \quad (4.32)$$

$$X_L = 2\pi \times 50 \times 1.9172 \times 10^{-2} = 6.0202 \Omega \quad (4.33)$$

$$Q_{\text{factor}} = 30 \quad (4.34)$$

$$R = \frac{6.0202}{30} = 0.2006 \Omega \quad (4.35)$$

Berikut ditampilkan data persentase harmonisa pada bus dan kabel setelah pemasangan filter orde 23 pada *network* SS-6.

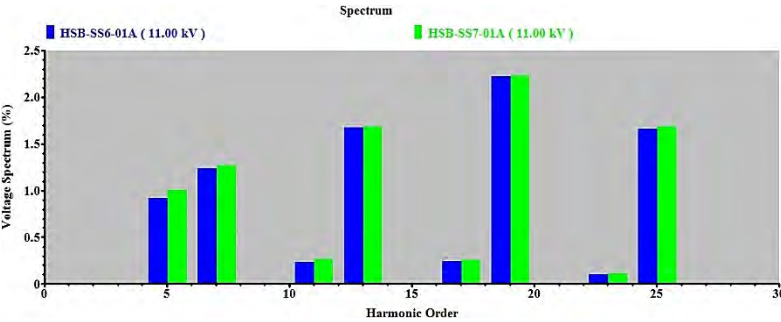
Tabel 4.19 Persentase Harmonisa Terhadap Tegangan Fundamental pada Orde Tertentu Setelah Pemasangan Filter Orde 23

BUS ID	kV	THDv (%)	ORDE (%)							
			5	7	11	13	17	19	23	25
HSB-SS6-01A	11	3.61	0.92	1.23	0.23	1.68	0.24	2.22	0.10	1.66
HSB-SS6-01B	11	3.61	0.92	1.23	0.23	1.63	0.24	1.91	3.52	2.93
HSB-SS7-01A	11	3.66	1.00	1.26	0.26	1.68	0.26	2.22	0.11	1.68
HSB-SS7-01B	11	3.66	1.00	1.26	0.26	1.64	0.26	1.92	3.53	2.94

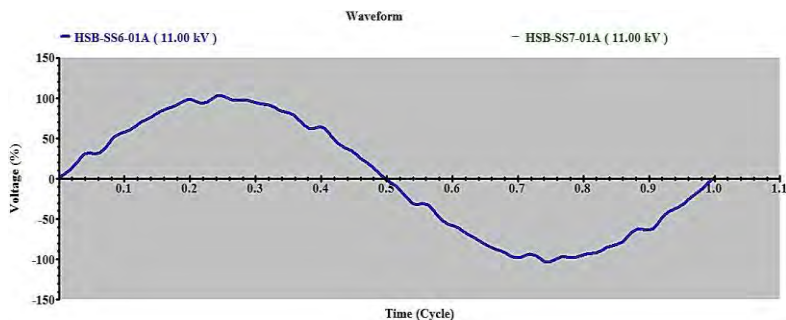
Tabel 4.20 Persentase Harmonisa Terhadap Arus Fundamental pada Orde Tertentu Setelah Pemasangan Filter Orde 23

ID	Arus (A)	THDi (%)	ORDE (%)							
			5	7	11	13	17	19	23	25
Cable 11	375.8	55.49	52.29	15.76	8.75	0.77	3.63	0.55	2.43	0.81
Cable 22	470.0	44.48	41.44	13.66	6.94	2.83	2.93	2.08	1.89	1.47

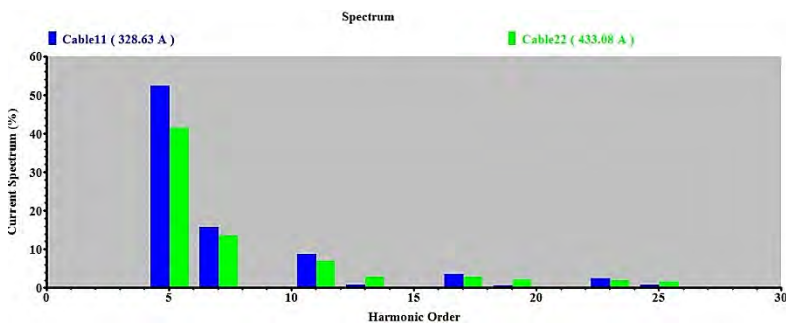
Pada tabel 4.19 dan 4.20 diatas terlihat bahwa THDv dan semua orde distorsi harmonisa individual tegangan telah memenuhi standar yang ditentukan. Sedangkan untuk harmonisa arus nilai THDi dan individual harmonik pada semua orde masih melebihi dari batas yang ditentukan. Oleh karena itu perlu pemasangan kembali filter pada network SS-7. Berikut adalah gambar diagram dan bentuk gelombang hasil proses *filtering* pada orde 11.



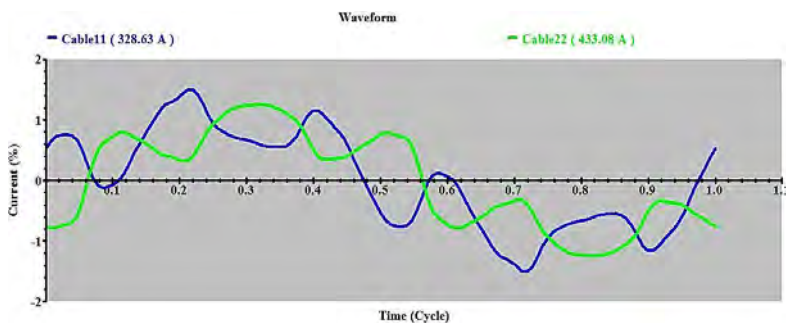
Gambar 4.27 Diagram Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 23



Gambar 4.28 Gelombang Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 23



Gambar 4.29 Gelombang Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 23



Gambar 4.30 Gelombang Arus pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 23

Berdasarkan gambar 4.27 dan 4.28, Bentuk gelombang tegangan telah semakin halus dan berbentuk sinusoidal. Sedangkan pada gelombang arus belum menunjukkan adanya perubahan yang berarti dan masih terjadi distorsi harmonisa yang cukup besar.

4.3.6 Perhitungan dan Pemasangan Filter Pasif Orde 5 pada *Network SS-7*

$$kVAR = 1787 \quad (4.36)$$

$$C = \frac{kVAR}{\omega_0 \times V_{LL}^2} \quad (4.37)$$

$$C = \frac{1787}{(2\pi \times 50) \times (11)^2} = 47.01 \mu F \quad (4.38)$$

$$L = \frac{1}{(2\pi \times 50 \times 5)^2 \times 47.01 \times 10^{-6}} = 8.6299 \times 10^{-3} H \quad (4.39)$$

$$X_L = 2\pi \times 50 \times 8.6299 \times 10^{-3} = 2.7098 \Omega \quad (4.40)$$

$$Q_{factor} = 30 \quad (4.41)$$

$$R = \frac{2.7098}{30} = 0.0903 \Omega \quad (4.42)$$

Berikut ditampilkan data persentase harmonisa pada bus dan kabel setelah pemasangan filter orde 5 pada *network SS-7*.

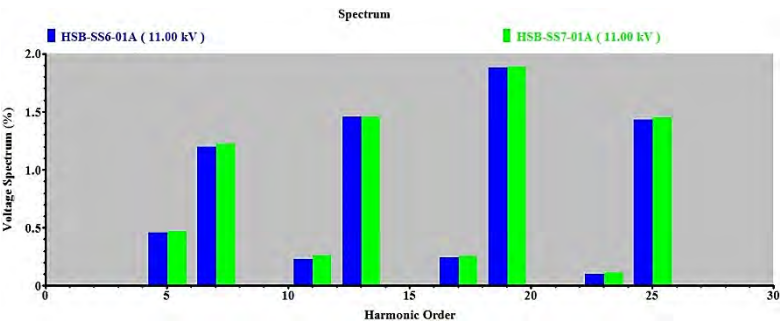
Tabel 4.21 Persentase Harmonisa Terhadap Tegangan Fundamental pada Orde Tertentu Setelah Pemasangan Filter Orde 5

BUS ID	kV	THD _v (%)	ORDE (%)							
			5	7	11	13	17	19	23	25
HSB-SS6-01A	11	3.08	0.46	1.19	0.23	1.46	0.24	1.88	0.10	1.43
HSB-SS6-01B	11	3.08	0.46	1.19	0.23	1.46	0.24	1.88	0.10	1.43
HSB-SS7-01A	11	3.10	0.47	1.22	0.26	1.46	0.25	1.88	0.11	1.45
HSB-SS7-01B	11	3.10	0.47	1.22	0.26	1.46	0.25	1.88	0.11	1.45

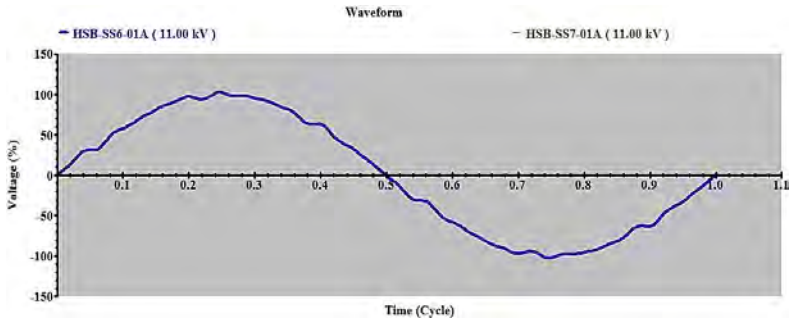
Tabel 4.22 Persentase Harmonisa Terhadap Arus Fundamental pada Orde Tertentu Setelah Pemasangan Filter Orde 23

ID	Arus (A)	THDi (%)	ORDE (%)							
			5	7	11	13	17	19	23	25
Cable 11	334.1	18.39	3.49	15.18	8.66	1.06	3.59	0.79	2.41	0.49
Cable 22	411.1	16.92	4.66	13.72	7.33	2.25	3.10	1.58	2.01	1.19

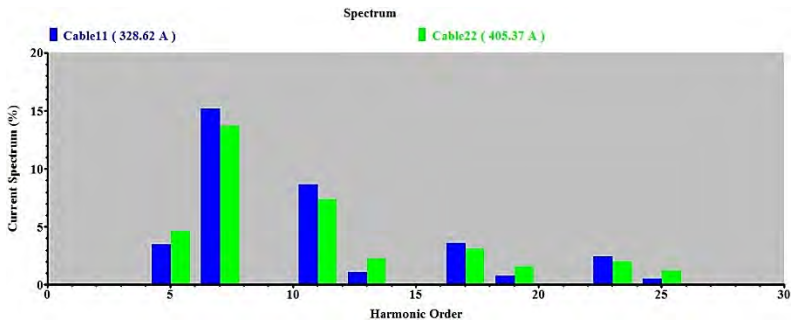
Hasil yang diperoleh berdasarkan tabel 4.21 dan 4.22 diatas menunjukkan terjadi penurunan nilai THDi yang cukup signifikan. Selain itu, nilai individual harmonisa arus pada orde 5 juga telah memenuhi standar yang ditentukan. Namun pada orde 7 dan seterusnya, nilai individual harmonisa arus masih melebihi batas yang ditentukan. Sedangkan untuk harmonisa tegangan nilai THDv dan individual harmonik pada semua orde telah memenuhi batas yang ditentukan. Pemasangan kembali filter pada orde selanjutnya diperlukan untuk menurunkan THDi. Berikut adalah gambar diagram dan bentuk gelombang hasil proses *filtering* pada orde 5.



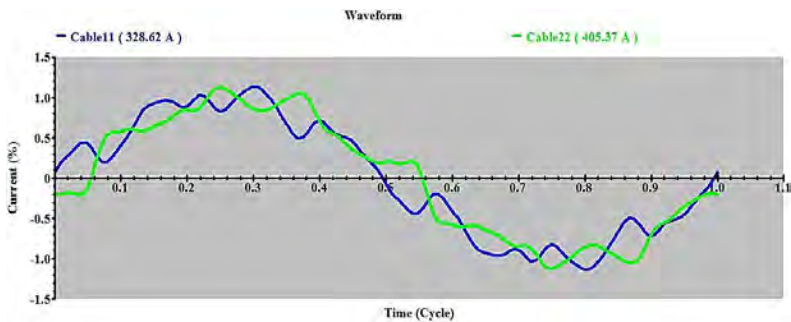
Gambar 4.31 Diagram Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 5



Gambar 4.32 Gelombang Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 5



Gambar 4.33 Diagram Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 5



Gambar 4.34 Gelombang Arus pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 25

Pada gambar 4.34 menunjukkan bentuk gelombang arus masih menunjukkan adanya *ripple* dan belum berbentuk sinus murni. Sedangkan pada gelombang tegangan menunjukkan gelombang sinusoidal yang semakin *smooth* (halus).

4.3.7 Perhitungan dan Pemasangan Filter Pasif Orde 7 pada Network SS-7

$$kVAR = 103 \quad (4.43)$$

$$C = \frac{kVAR}{\omega_0 \times V_{LL}^2} \quad (4.44)$$

$$C = \frac{103}{(2\pi \times 50) \times (11)^2} = 2.71 \mu F \quad (4.45)$$

$$L = \frac{1}{(2\pi \times 50 \times 7)^2 \times 2.71 \times 10^{-6}} = 7.637 \times 10^{-2} H \quad (4.46)$$

$$X_L = 2\pi \times 50 \times 7.637 \times 10^{-2} = 23.983 \Omega \quad (4.47)$$

$$Q_{factor} = 30 \quad (4.48)$$

$$R = \frac{23.983}{30} = 0.7994 \Omega \quad (4.49)$$

Berikut ditampilkan data persentase harmonisa pada bus dan kabel setelah pemasangan filter orde 7 pada *network* SS-7.

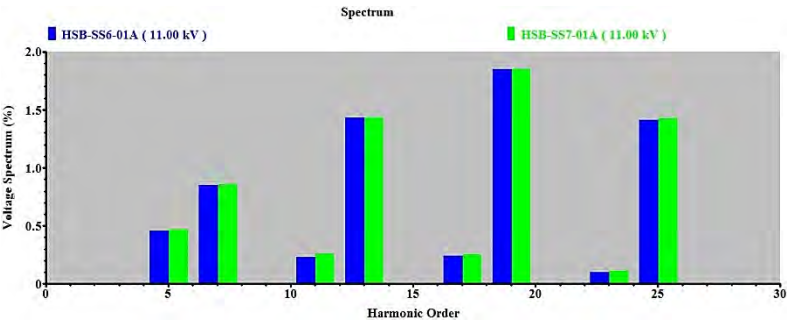
Tabel 4.23 Persentase Harmonisa Terhadap Tegangan Fundamental pada Orde Tertentu Setelah Pemasangan Filter Orde 7

BUS ID	kV	THD _v (%)	ORDE (%)							
			5	7	11	13	17	19	23	25
HSB-SS6-01A	11	2.92	0.46	0.85	0.23	1.43	0.24	1.85	0.10	1.41
HSB-SS6-01B	11	2.92	0.46	0.85	0.23	1.43	0.24	1.85	0.10	1.41
HSB-SS7-01A	11	2.94	0.47	0.86	0.26	1.43	0.25	1.85	0.11	1.42
HSB-SS7-01B	11	2.94	0.47	0.86	0.26	1.43	0.25	1.85	0.11	1.42

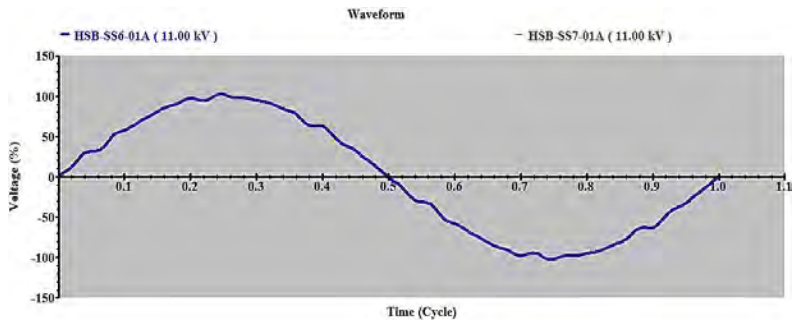
Tabel 4.24 Persentase Harmonisa Terhadap Arus Fundamental pada Orde Tertentu Setelah Pemasangan Filter Orde 7

ID	Arus (A)	THDi (%)	ORDE (%)							
			5	7	11	13	17	19	23	25
Cable 11	331.0	12.00	3.50	6.02	8.65	1.09	3.59	0.82	2.41	0.46
Cable 22	407.2	11.66	4.69	6.17	7.34	2.16	3.10	1.52	2.01	1.16

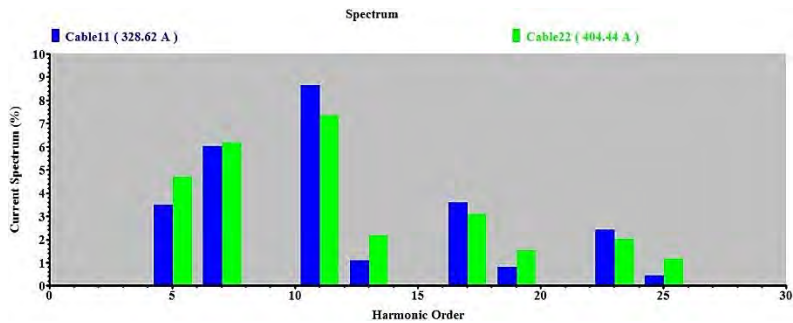
Pada tabel 4.23 dan 4.24 diatas terlihat bahwa distorsi harmonisa individual arus pada orde 7 telah memenuhi standar yang ditentukan. Namun untuk individual tegangan pada orde 11 dan seterusnya masih melebihi batas yang ditentukan. Begitu juga dengan nilai THDi yang masih melebihi standar yang ditentukan. Sedangkan untuk harmonisa tegangan nilai THDv dan individual harmonik pada semua orde telah memenuhi batas yang ditentukan. Pemasangan kembali filter pada orde selanjutnya diperlukan untuk menurunkan THDi. Berikut adalah gambar diagram dan bentuk gelombang hasil proses *filtering* pada orde 7.



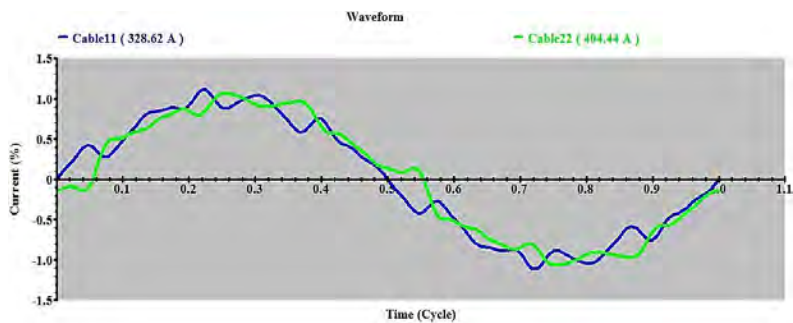
Gambar 4.35 Diagram Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 7



Gambar 4.36 Gelombang Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 7



Gambar 4.37 Diagram Arus pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 7



Gambar 4.38 Gelombang Arus pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 7

Berdasarkan gambar 4.37 dan 4.38, Bentuk gelombang arus sistem semakin menuju ke bentuk sinusoidal. Namun masih terdapat *ripple*. Sedangkan pada gelombang tegangan, dengan menurunnya nilai THDv maka bentuk gelombang sinusoidal semakin *smooth* (halus).

4.3.8 Perhitungan dan Pemasangan Filter Pasif Orde 11 pada Network SS-7

$$\text{kVAR} = 103 \quad (4.50)$$

$$C = \frac{\text{kVAR}}{\omega_0 \times V_{LL}^2} \quad (4.51)$$

$$C = \frac{103}{(2\pi \times 50) \times (11)^2} = 2.71 \mu\text{F} \quad (4.52)$$

$$L = \frac{1}{(2\pi \times 50 \times 7)^2 \times 2.71 \times 10^{-6}} = 7.637 \times 10^{-2} \text{ H} \quad (4.53)$$

$$X_L = 2\pi \times 50 \times 7.637 \times 10^{-2} = 9.7121 \Omega \quad (4.54)$$

$$Q_{\text{factor}} = 30 \quad (4.55)$$

$$R = \frac{23.983}{30} = 0.3237 \Omega \quad (4.56)$$

Berikut ditampilkan data persentase harmonisa pada bus dan kabel setelah pemasangan filter orde 11 pada *network* SS-7.

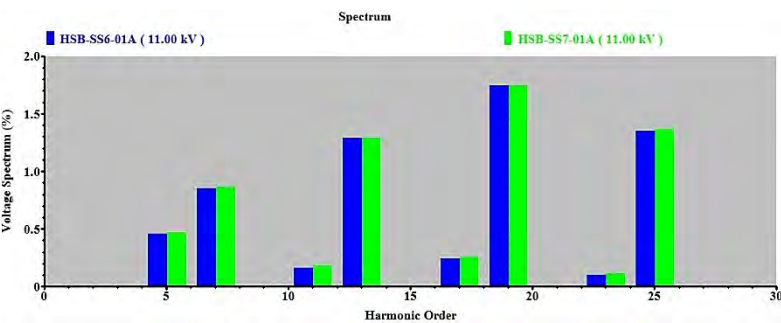
Tabel 4.25 Persentase Harmonisa Terhadap Tegangan Fundamental pada Orde Tertentu Setelah Pemasangan Filter Orde 11

BUS ID	kV	THDv (%)	ORDE (%)							
			5	7	11	13	17	19	23	25
HSB-SS6-01A	10.99	2.75	0.46	0.85	0.16	1.29	0.24	1.74	0.10	1.35
HSB-SS6-01B	10.99	2.75	0.46	0.85	0.16	1.29	0.24	1.74	0.10	1.35
HSB-SS7-01A	11	2.77	0.47	0.86	0.18	1.29	0.25	1.74	0.11	1.36
HSB-SS7-01B	11	2.77	0.47	0.86	0.18	1.29	0.25	1.74	0.11	1.36

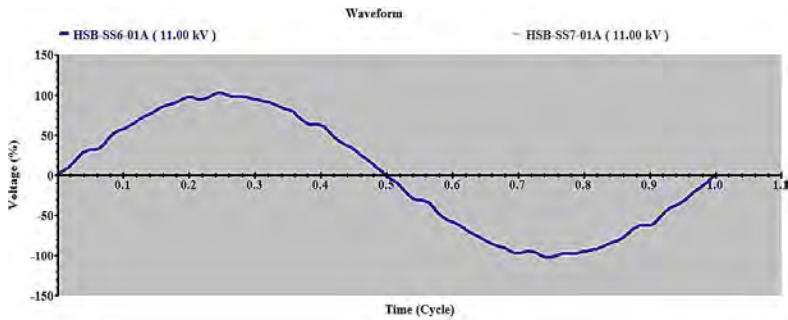
Tabel 4.26 Persentase Harmonisa Terhadap Arus Fundamental pada Orde Tertentu Setelah Pemasangan Filter Orde 11

ID	Arus (A)	THDi (%)	ORDE (%)							
			5	7	11	13	17	19	23	25
Cable 11	330.0	9.13	3.50	6.02	3.69	1.31	3.57	0.90	2.41	0.37
Cable 22	405.4	9.54	4.71	6.23	3.27	1.67	3.09	1.32	2.01	1.06

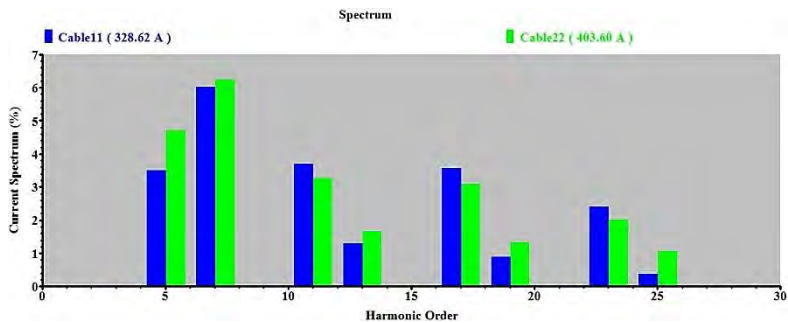
Hasil yang diperoleh berdasarkan tabel 4.25 dan 4.26 diatas menunjukkan terjadi penurunan nilai THDi yang cukup signifikan. Selain itu, nilai individual harmonisa arus pada orde 11 juga telah memenuhi standar yang ditentukan. Namun pada orde 17 dan seterusnya, nilai individual harmonisa arus masih melebihi batas yang ditentukan. Sedangkan untuk harmonisa tegangan nilai THDv dan individual harmonik pada semua orde telah memenuhi batas yang ditentukan. Pemasangan kembali filter pada orde selanjutnya diperlukan untuk menurunkan THDi. Berikut adalah gambar diagram dan bentuk gelombang hasil proses *filtering* pada orde 11.



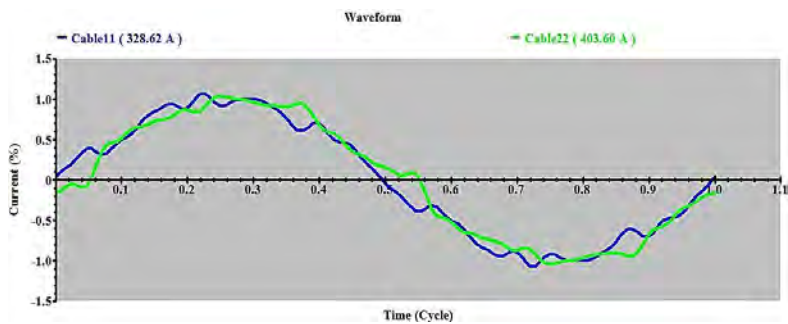
Gambar 4.39 Diagram Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 11



Gambar 4.40 Gelombang Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 11



Gambar 4.41 Diagram Arus pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 11



Gambar 4.42 Gelombang Arus pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 11

Pada gambar 4.40 menunjukkan bentuk gelombang arus masih menunjukkan adanya *ripple* dan belum berbentuk sinus murni. Sedangkan pada gelombang tegangan menunjukkan gelombang sinusoidal yang semakin *smooth* (halus).

4.3.9 Perhitungan dan Pemasangan Filter Pasif Orde 17 pada Network SS-7

$$\text{kVAR} = 84 \quad (4.57)$$

$$C = \frac{\text{kVAR}}{\omega_0 \times V_{LL}^2} \quad (4.58)$$

$$C = \frac{46}{(2\pi \times 50) \times (11)^2} = 2.21 \mu\text{F} \quad (4.59)$$

$$L = \frac{1}{(2\pi \times 50 \times 17)^2 \times 2.21 \times 10^{-6}} = 1.588 \times 10^{-2} \text{ H} \quad (4.60)$$

$$X_L = 2\pi \times 50 \times 2.9003 \times 10^{-2} = 4.9863 \Omega \quad (4.61)$$

$$Q_{\text{factor}} = 30 \quad (4.62)$$

$$R = \frac{4.9863}{30} = 0.1662 \Omega \quad (4.63)$$

Berikut ditampilkan data persentase harmonisa pada bus dan kabel setelah pemasangan filter orde 17 pada *network* SS-7.

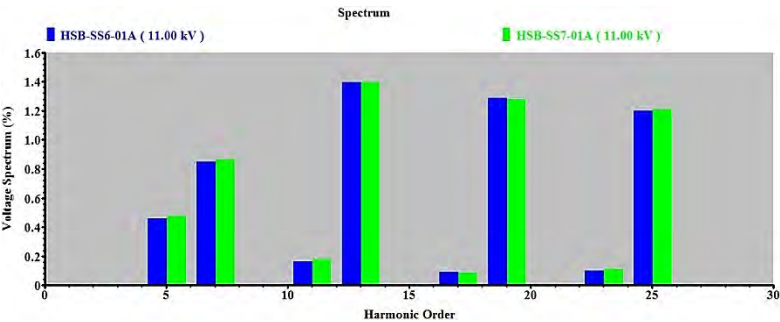
Tabel 4.27 Persentase Harmonisa Terhadap Tegangan Fundamental pada Orde Tertentu Setelah Pemasangan Filter Orde 17

BUS ID	kV	THDv (%)	ORDE (%)							
			5	7	11	13	17	19	23	25
HSB-SS6-01A	10.99	2.46	0.46	0.85	0.16	1.40	0.09	1.29	0.10	1.20
HSB-SS6-01B	10.99	2.46	0.46	0.85	0.16	1.40	0.09	1.29	0.10	1.20
HSB-SS7-01A	11	2.47	0.47	0.86	0.18	1.40	0.08	1.28	0.11	1.21
HSB-SS7-01B	11	2.47	0.47	0.86	0.18	1.40	0.08	1.28	0.11	1.21

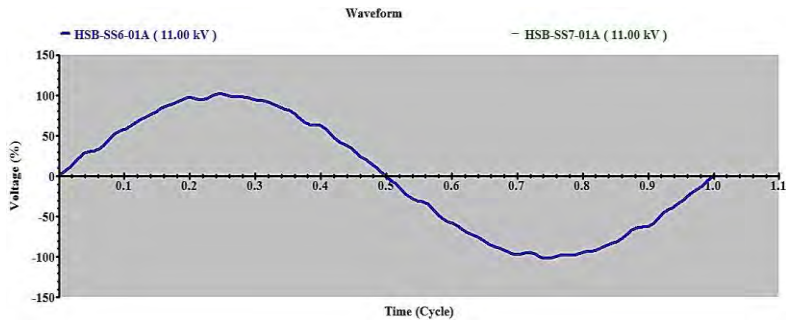
Tabel 4.28 Persentase Harmonisa Terhadap Arus Fundamental pada Orde Tertentu Setelah Pemasangan Filter Orde 17

ID	Arus (A)	THDi (%)	ORDE (%)							
			5	7	11	13	17	19	23	25
Cable 11	329.8	8.51	3.50	6.02	3.70	1.15	1.18	1.31	2.39	0.16
Cable 22	404.6	9.07	4.72	6.26	3.29	2.05	0.89	0.49	2.00	0.82

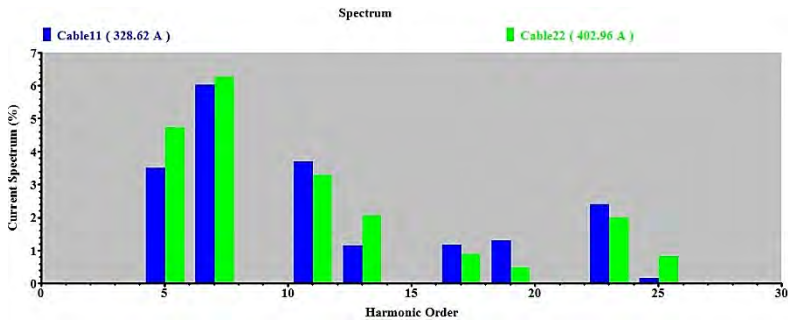
Pada tabel 4.27 dan 4.28 diatas terlihat bahwa distorsi harmonisa individual arus pada orde 17 telah memenuhi standar yang ditentukan. Namun untuk individual tegangan pada orde 23 dan seterusnya masih melebihi batas yang ditentukan. Begitu juga dengan nilai THDi yang masih melebihi standar yang ditentukan. Sedangkan untuk harmonisa tegangan nilai THDv dan individual harmonik pada semua orde telah memenuhi batas yang ditentukan. Pemasangan kembali filter pada orde selanjutnya diperlukan untuk menurunkan THDi. Berikut adalah gambar diagram dan bentuk gelombang hasil proses *filtering* pada orde 17.



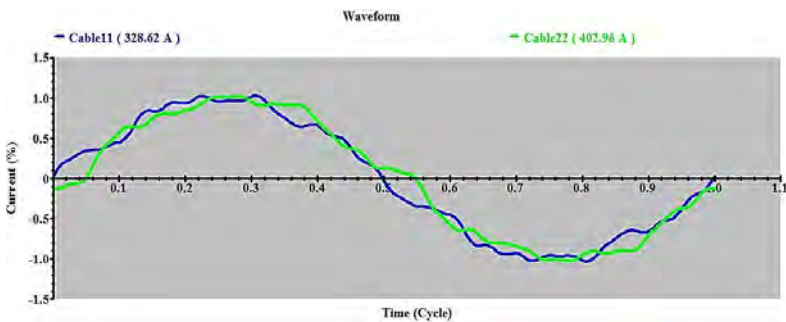
Gambar 4.43 Diagram Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 17



Gambar 4.44 Gelombang Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 17



Gambar 4.45 Diagram Arus pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 17



Gambar 4.46 Gelombang Arus pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 17

Berdasarkan gambar 4.43 dan 4.44, Bentuk gelombang arus sistem semakin menuju ke bentuk sinusoidal. Namun masih terdapat *ripple*. Sedangkan pada gelombang tegangan, dengan menurunnya nilai THDv maka bentuk gelombang sinusoidal semakin *smooth* (halus).

4.2.10 Perhitungan dan Pemasangan Filter Pasif Orde 23 pada Network SS-7

$$\text{kVAR} = 57 \quad (4.64)$$

$$C = \frac{\text{kVAR}}{\omega_0 \times V_{LL}^2} \quad (4.65)$$

$$C = \frac{38}{(2\pi \times 50) \times (11)^2} = 1.499 \mu\text{F} \quad (4.66)$$

$$L = \frac{1}{(2\pi \times 50 \times 23)^2 \times 1.499 \times 10^{-6}} = 1.279 \times 10^{-2} \text{ H} \quad (4.67)$$

$$X_L = 2\pi \times 50 \times 1.279 \times 10^{-2} = 4.0161 \Omega \quad (4.68)$$

$$Q_{\text{factor}} = 30 \quad (4.69)$$

$$R = \frac{4.0161}{30} = 0.1338 \Omega \quad (4.70)$$

Berikut ditampilkan data persentase harmonisa pada bus dan kabel setelah pemasangan filter orde 23 pada *network* SS-7.

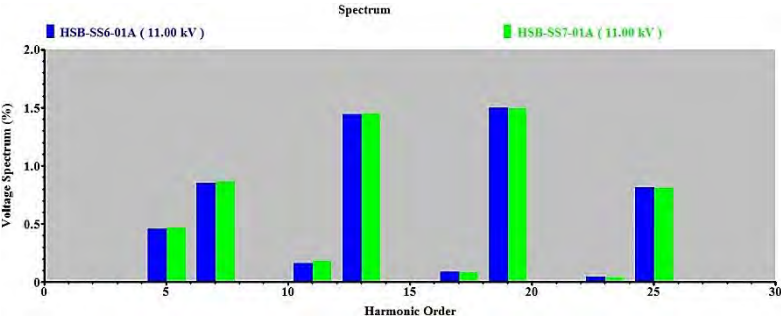
Tabel 4.29 Persentase Harmonisa Terhadap Tegangan Fundamental pada Orde Tertentu Setelah Pemasangan Filter Orde 23

BUS ID	kV	THDv (%)	ORDE (%)							
			5	7	11	13	17	19	23	25
HSB-SS6-01A	10.99	2.45	0.46	0.85	0.16	1.45	0.09	1.50	0.05	0.81
HSB-SS6-01B	10.99	2.45	0.46	0.85	0.16	1.45	0.09	1.50	0.05	0.81
HSB-SS7-01A	11	2.45	0.47	0.86	0.18	1.45	0.08	1.49	0.04	0.81
HSB-SS7-01B	11	2.45	0.47	0.86	0.18	1.45	0.08	1.49	0.04	0.81

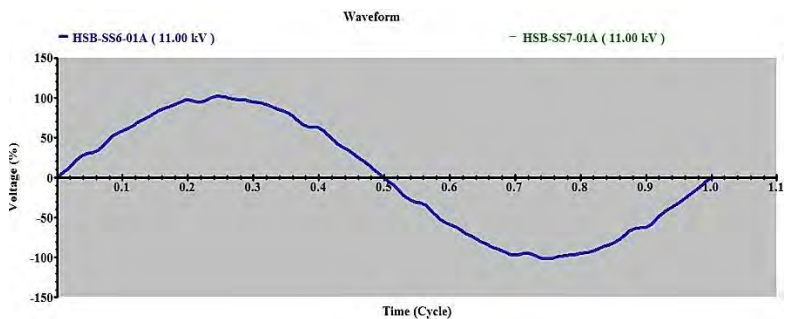
Tabel 4.30 Persentase Harmonisa Terhadap Arus Fundamental pada Orde Tertentu Setelah Pemasangan Filter Orde 23

ID	Arus (A)	THDi (%)	ORDE (%)							
			5	7	11	13	17	19	23	25
Cable 11	329.7	8.16	3.50	6.02	3.71	1.07	1.18	1.12	0.57	0.39
Cable 22	404.2	8.92	4.73	6.28	3.29	2.23	0.90	0.86	0.43	0.28

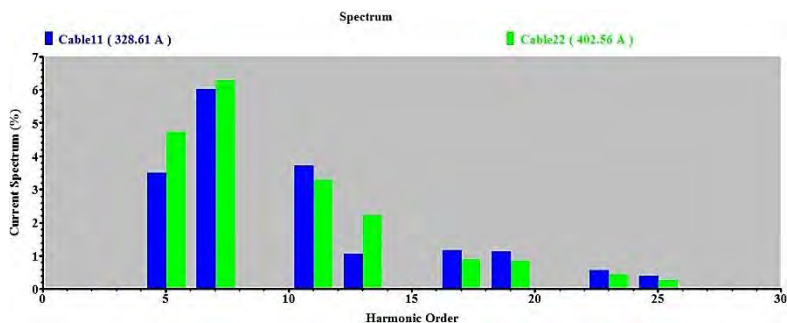
Hasil yang diperoleh berdasarkan tabel 4.29 dan 4.30 diatas menunjukkan terjadi penurunan nilai THDi yang cukup signifikan. Selain itu, nilai individual harmonisa arus pada orde 23 juga telah memenuhi standar yang ditentukan. Namun nilai THDi masih melebihi batas yang ditentukan. Sedangkan untuk harmonisa tegangan nilai THDv dan individual harmonik pada semua orde telah memenuhi batas yang ditentukan. Pada pemasangan filter ini, semua nilai individual harmonik baik tegangan maupun arus serta nilai THDv telah memenuhi standar yang ditetapkan. Namun pada data diatas didapat nilai THDi masih belum dapat sesuai dengan standar. Dalam hal ini, dapat dikatakan bahwa pemasangan filter pasif pada plant ini belum dapat menurunkan nilai THDi. Oleh karena itu selanjutnya ditambahkan filter aktif kedalam sistem untuk mengatasi permasalahan tersebut. Sehingga digunakan kombinasi antara kedua jenis filter tersebut. Kombinasi antara filter pasif dan aktif dapat disebut dengan filter hybrid. Berikut adalah gambar diagram dan bentuk gelombang hasil proses *filtering* pada orde 23.



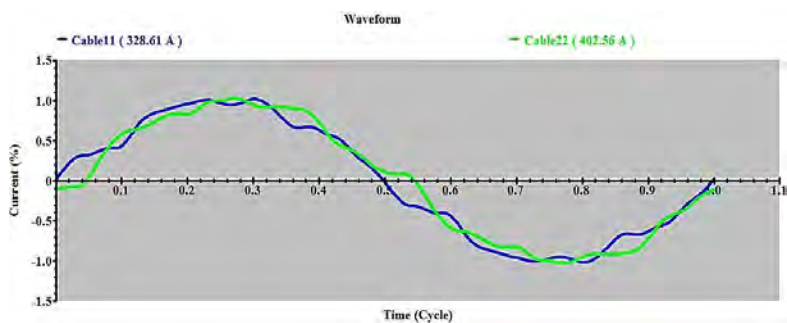
Gambar 4.47 Diagram Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 23



Gambar 4.48 Gelombang Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 23



Gambar 4.49 Diagram Arus pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 23



Gambar 4.50 Gelombang Arus pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 23

Pada gambar 4.49 dan 4.50 menunjukkan bentuk diagram dan gelombang arus. Pada diagram menunjukkan nilai individual arus harmonik masih tinggi pada orde kelima dan ketujuh. Pada bentuk gelombang arus juga masih menunjukkan adanya *ripple* dan belum berbentuk sinus murni. Sedangkan pada bentuk diagram tegangan, semua orde telah memenuhi standar. Selain itu, bentuk gelombang tegangan menunjukkan gelombang sinusoidal yang semakin *smooth* (halus).

4.4 Pemasangan dan Perhitungan Spesifikasi Filter Aktif

Pemasangan filter aktif pada *plant* Pakistan Deep Water Containeer Port dilakukan untuk meredam distorsi harmonisa yang tidak dapat teredam menggunakan filter pasif. Pada pemasangan filter pasif sebelumnya berhasil menurunkan nilai distorsi harmonisa individual baik tegangan dan arus serta THDv sesuai standar IEEE 519-1992. Untuk nilai THDi terbukti filter pasif belum dapat menurunkan sesuai dengan standar yang diperbolehkan. Pada tabel 4.27 setelah pemasangan filter pasif orde 23, nilai THDi masih berada pada 8.92% pada Bus HSB-SS7-01A. Berdasarkan perhitungan I_{sc}/I_L yang dilakukan di awal sebelum pemasangan filter untuk nilai I_{sc}/I_L antara 20-50 pada level tegangan 11 kV didapat batas maksimal nilai THDi pada Bus HSB-SS7-01A adalah sebesar 8%. Oleh sebab itu, perlu dilakukan pemasangan dan perhitungan spesifikasi filter aktif kedalam sistem sehingga dapat menurunkan atau bahkan menghilangkan semua sumber harmonisa yang terdapat pada *plant* tersebut.

Simulasi pembuatan filter aktif dilakukan pada *software* Psim dengan memasukkan data VFD yang terdapat pada ETAP. Pada tugas akhir ini, VFD yang dimasukkan pada Psim merupakan VFD untuk motor yang berkapsitas besar. Data yang dimasukkan ke Psim berupa karakteristik nilai *magnitude* dari VFD tersebut. Setelah itu dilakukan running program dan didapat nilai magnitude VFD hasil proses *filtering*. Kemudian hasil berupa *magnitude* tersebut dikonversikan kembali kedalam bentuk VFD baru pada ETAP. VFD baru tersebut merupakan VFD yang telah diberi filter aktif. Selanjutnya dilakukan *running* harmonisa kembali pada ETAP dan didapatkan hasil dari penggunaan kombinasi filter pasif dan aktif atau biasa disebut filter *hybrid*. Untuk lebih jelasnya terkait pemodelan rangkaian filter aktif, proses memasukkan serta menkonversi VFD dan hasil yang diperoleh akan dijelaskan pada sub bab berikut ini.

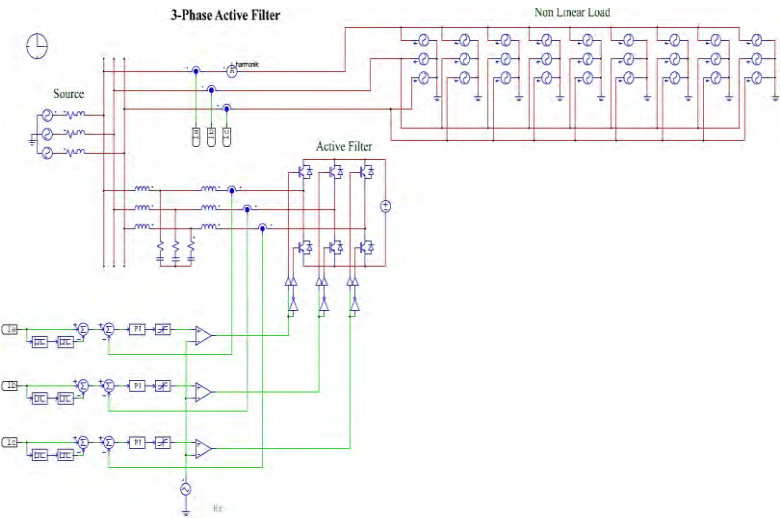
4.4.1 Rangkaian Filter Aktif pada Psim

Berikut adalah pemodelan filter aktif yang ada pada Psim, dengan beban non linier dan penggunaan parameter sebagai berikut :

Tabel 4.31 Data Beban Non Linier (kiri) dan Parameter Filter Aktif (kanan)

Data Beban Non linier		Parameter Filter Aktif	
Orde	Nilai	Elemen	Parameter
5	42%	Vdc	1000 V
7	14.3%	L ₁	0.002 H
11	7.9%	L ₂	0,0005 H
13	3.2%	R	0.1 Ω
17	3.7%	C	2 μF
19	2.3%	K _P	10
23	2.3%	K _C	5
25	1.4%	F _c	10020 Hz

Berikut adalah gambar rangkaian simulasi filter aktif yang dimodelkan pada *software* Psim :



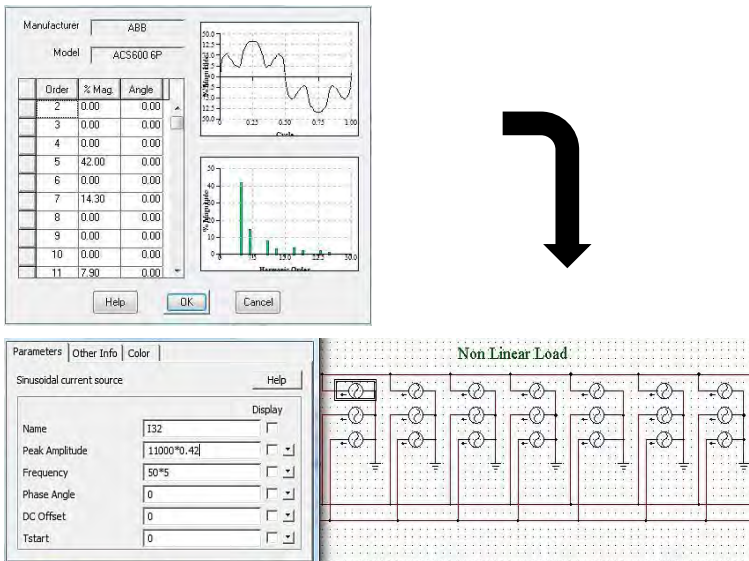
Gambar 4.51 Pemodelan Rangkaian Filter Aktif pada Psim

4.4.2 Simulasi dan Pemasangan Filter Aktif

Pada tugas akhir ini, simulasi dan pemasangan filter aktif menggunakan Psim dan ETAP. Untuk melakukan simulasi pada Psim, terlebih dahulu dilakukan pengambilan data karakteristik VFD pada *plant* Pakistan Deep Water Container Port yang terdapat didalam ETAP. Berikut akan dijelaskan mulai dari simulasi hingga hasil yang diperoleh.

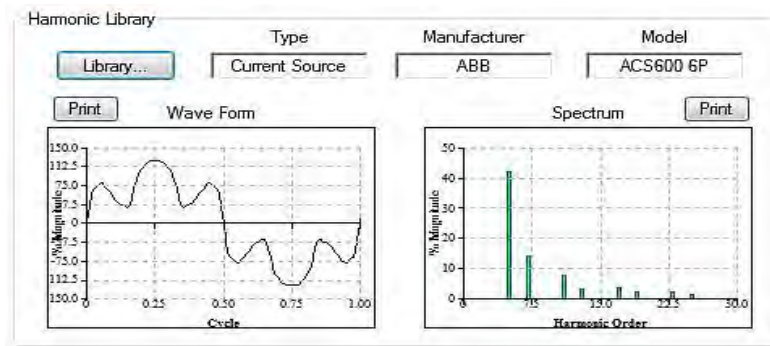
4.4.2.1 Konversi Data Karakteristik VFD dari ETAP ke Psim

Mekanisme pengambilan data karakteristik VFD dari ETAP adalah dengan mengambil data *magnitude* dari VFD tersebut kemudian memasukkan kedalam sumber harmonik yang terdapat pada rangkaian filter aktif pada Psim. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar di bawah ini :

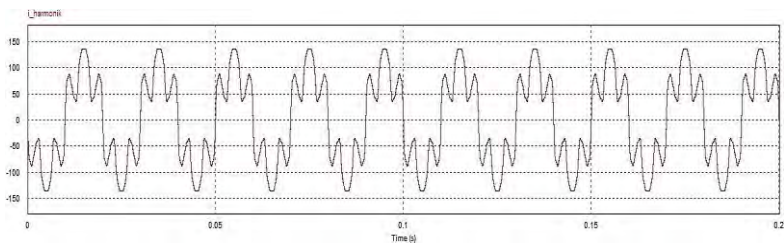


Gambar 4.52 Konversi Data Karakteristik VFD dari ETAP ke Psim

Nilai *magnitude* dari VFD dimasukkan ke dalam sumber harmonik (*Non Linier Load*) yang ada pada Psim sesuai dengan orde atau frekuensinya. Untuk memastikan bahwa data VFD yang dimasukkan ke dalam Psim sesuai dengan data yang terdapat pada ETAP maka dilakukan *running* bentuk gelombang sumber harmonik tersebut.



Gambar 4.53 Bentuk Gelombang dan Diagram Karakteristik VFD yang terdapat pada ETAP

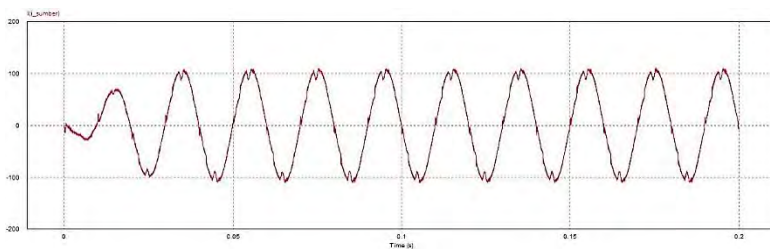


Gambar 4.54 Bentuk Gelombang Karakteristik VFD yang terdapat pada Psim

Pada gambar 4.53 dan 4.54 dapat disimpulkan bahwa bentuk gelombang yang terdapat pada ETAP dan Psim telah identik atau sama.

4.4.2.2 Hasil Simulasi Filter Aktif pada Psim

Bentuk gelombang hasil proses *filtering* adalah sebagai berikut :



Gambar 4.55 Bentuk Gelombang Setelah *Running* Simulasi

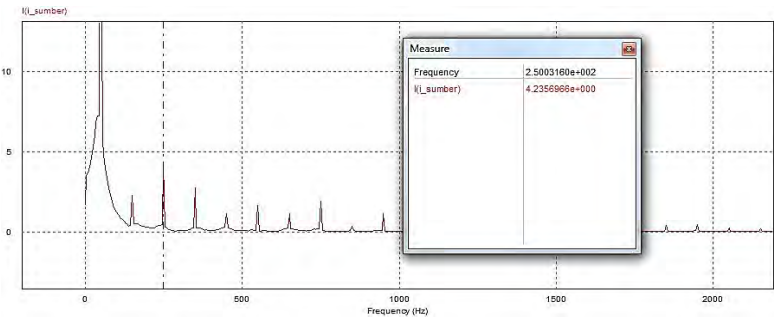
Tabel 4.32 Hasil Persentase Harmonisa Sebelum dan Setelah Simulasi Filter Aktif

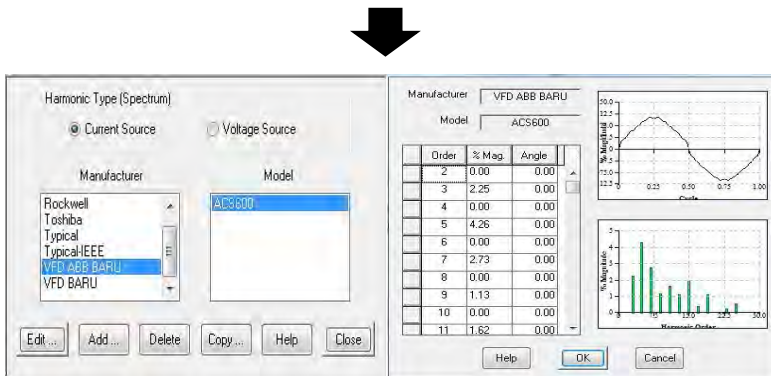
Sebelum Simulasi		Setelah Simulasi	
Orde	Nilai	Orde	Nilai
5	42 %	5	4.26 %
7	14.3 %	7	2.73 %
11	7.9 %	11	1.62 %
13	3.2 %	13	1.12 %
17	3.7 %	17	0.36 %
19	2.3 %	19	1.11 %
23	2.3 %	23	0.22 %
25	1.4 %	25	0.55 %

Pada gambar 4.55 menunjukkan bahwa kinerja filter aktif telah mampu memperbaiki gelombang harmonisa. Pada tabel 4.32 hasil *magnitude* harmonisa setelah simulasi terjadi penurunan yang signifikan. *Magnitude* dari gelombang sumber inilah yang dimasukkan sebagai data karakteristik dalam bentuk VFD baru yang digunakan pada ETAP.

4.4.2.3 Konversi Data VFD Baru dari Psim ke ETAP

Untuk mendapatkan data *magnitude* VFD baru perlu dilakukan *running Fast Fourier Transform* (FFT) pada gelombang hasil simulasi filter aktif yang terdapat pada Psim. Kemudian didapatkan *magnitude* harmonisa sesuai dengan orde masing-masing. Setelah itu, nilai *magnitude* tersebut dikonversikan kedalam ETAP dalam bentuk VFD baru. VFD baru tersebut merupakan VFD yang telah diberikan filter aktif. Berikut adalah mekanisme konversi data VFD baru ke dalam ETAP.





Gambar 4.56 Konversi Data *Magnitude* VFD baru dari Psim ke ETAP

4.4.2.4 Hasil Simulasi Filter Hybrid pada ETAP

Setelah dikonversi dari Psim ke ETAP, VFD baru yang telah diberikan filter aktif tersebut dipasang pada motor yang memiliki kapasitas terbesar pada *network* SS-6 dan SS-7. Berikut ditampilkan data persentase harmonisa pada bus dan kabel setelah pemasangan filter *hybrid* pada *network* SS-6 dan SS-7.

Tabel 4.33 Persentase Harmonisa Terhadap Tegangan Fundamental pada Orde Tertentu Setelah Pemasangan Filter *Hybrid*

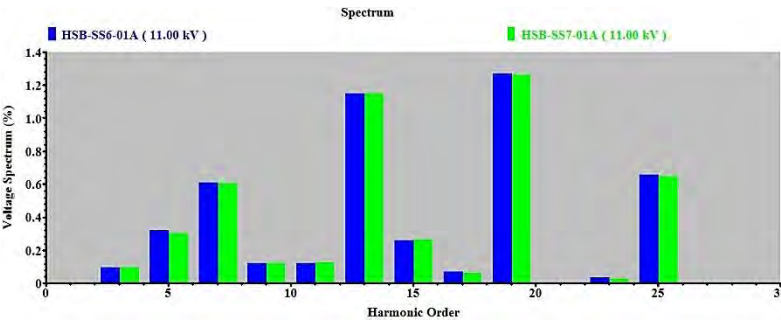
BUS ID	kV	THD _v (%)	ORDE (%)							
			5	7	11	13	17	19	23	25
HSB-SS6-01A	10.99	2.11	0.37	0.70	0.13	1.23	0.07	1.31	0.04	0.69
HSB-SS6-01B	10.99	2.11	0.37	0.70	0.13	1.23	0.07	1.31	0.04	0.69
HSB-SS7-01A	11	2.10	0.38	0.71	0.14	1.22	0.06	1.30	0.03	0.69
HSB-SS7-01B	11	2.10	0.38	0.71	0.14	1.22	0.06	1.30	0.03	0.69

Tabel 4.34 Persentase Harmonisa Terhadap Arus Fundamental pada Orde Tertentu Setelah Pemasangan Filter *Hybrid*

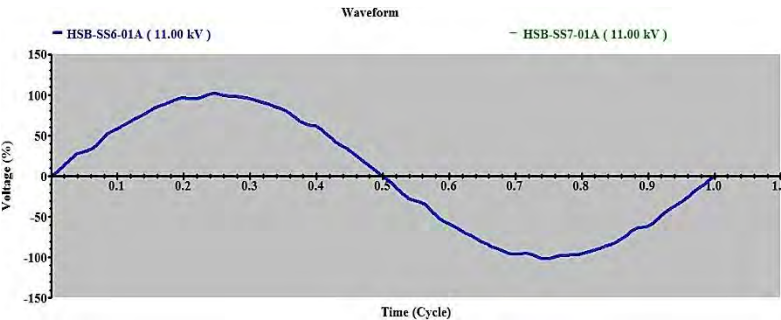
ID	Arus (A)	THD _i (%)	ORDE (%)							
			5	7	11	13	17	19	23	25
Cable 11	329.1	5.15	0.66	3.89	2.43	1.14	1.29	1.12	0.62	0.42
Cable 22	403.3	6.07	2.67	4.38	0.34	2.22	1.00	0.63	0.48	0.22

Hasil yang diperoleh berdasarkan tabel 4.33 dan 4.34 diatas menunjukkan terjadi penurunan nilai THDv dan THDi. Setelah dipasang filter *hybrid* kedalam sistem, nilai THDi yang sebelumnya melebihi standar yang ditentukan, sekarang memenuhi dari batas nilai yang ditentukan. Begitu juga dengan nilai individual harmonik tegangan dan arus, nilai pada semua orde juga telah memenuhi batas yang ditentukan. Sehingga dapat disimpulkan bahwa untuk meredeam semua distorsi harmonisa yang terdapat pada Proyek Pakistan Deep Water Container Port dibutuhkan pemasangan filter *hybrid* pada plant tersebut.

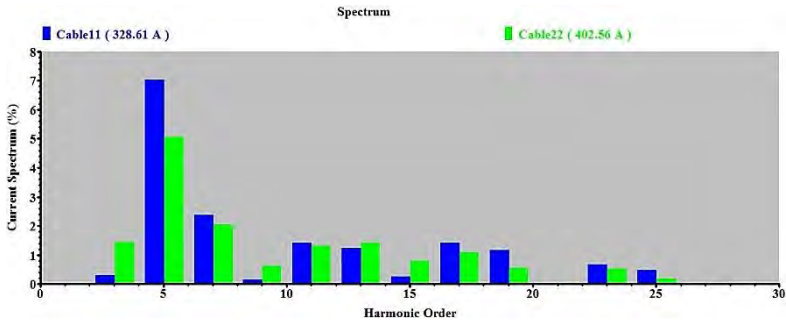
Untuk memperjelas hasil kinerja dari filter *hybrid* pada sistem, berikut ditampilkan gambar diagram dan gelombang tegangan beserta arus hasil proses *filtering* pada network SS-6 dan SS-7.



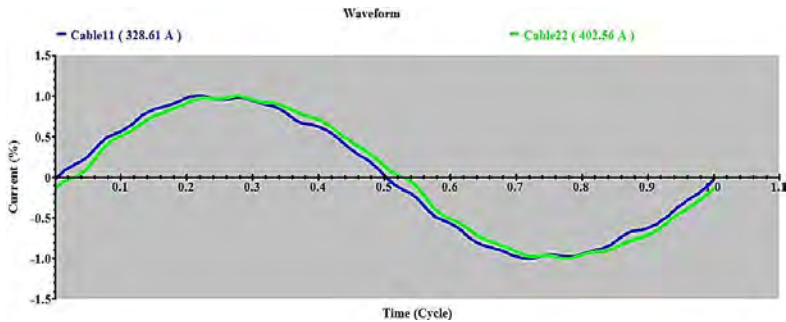
Gambar 4.57 Diagram Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter *Hybrid*



Gambar 4.58 Gelombang Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter *Hybrid*



Gambar 4.59 Diagram Arus pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter *Hybrid*



Gambar 4.60 Gelombang Arus pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter *Hybrid*

Hasil bentuk diagram dan gelombang tegangan serta arus setelah pemasangan filter *hybrid* ini menunjukkan penurunan distorsi harmonisa hingga memenuhi standar yang ditentukan. Bentuk gelombang tegangan karena pemasangan filter *hybrid* telah berbentuk sinusoidal yang semakin *smooth* (halus). Begitu juga dengan gelombang arus, sebelum dipasang filter *hybrid* gelombang tersebut masih terdapat *ripple*. Setelah pemasangan filter *hybrid*, *ripple* tersebut mengalami penurunan yang cukup signifikan. Bentuk gelombang arus menjadi berbentuk sinusoidal. Sehingga dapat disimpulkan pemasangan filter *hybrid* mampu memperbaiki bentuk gelombang tegangan maupun arus pada sistem yang awalnya terdapat *ripple* menjadi bentuk sinusoidal.

4.5 Perbandingan Setelah Pemasangan Filter *Hybrid*

Berikut adalah perbandingan antara menggunakan filter pasif dengan filter *hybrid*.

Tabel 4.35 Perbandingan antara menggunakan filter pasif dan filter *Hybrid*

Bus ID	Isc/I _L	THD _v		THDi	
		Filter Pasif	Filter <i>Hybrid</i>	Filter Pasif	Filter <i>Hybrid</i>
HSB-SS6-01A	63.4	2.45	2.11	8.16	5.15
HSB-SS6-01B	63.4	2.45	2.11	8.16	5.15
HSB-SS7-01A	38.43	2.45	2.10	8.92	6.07
HSB-SS7-01B	38.43	2.45	2.10	8.92	6.07

Berikut adalah hasil simulasi harmonisa pada sistem kelistrikan setelah ditambahkan filter *hybrid*.

Tabel 4.36 Data Hasil Simulasi Aliran Daya pada Bus Generator Setelah Pemasangan Filter *Hybrid*

ID BUS	kV	kW	kVAR	kVA	%pf
Bus 2	11	5887	748	5934	99.2
Bus 3	11	7500	3000	8078	92.8
Bus 4	11	7500	2000	7761	96.6
Bus 5	11	1000	500	1118	89.4
Bus 31	11	1000	500	1118	89.4

Tabel 4.37 Data Hasil Simulasi Aliran Daya pada Bus Penyulang Utama (*Main Bus*) Setelah Pemasangan Filter *Hybrid*

ID BUS	kV	kW	kVAR	kVA	%pf
MV-CP-004A	11	21492	5665	22227	96.7
Bus 13	11	1392	1081	1762	79.0
Bus 14	0.4	1368	907	1641	83.3

Tabel 4.38 Data Hasil Simulasi Aliran Daya pada *Network* SS-6 dan SS-7 (Bus Harmonisa) Setelah pemasangan filter *Hybrid*

ID BUS	kV	kW	kVAR	kVA	%pf
HSB-SS6-01A	11	6259	113	6260	100.0
HSB-SS7-01A	11	7602	1005	7668	99.1

Berikut adalah hasil simulasi harmonisa pada sistem kelistrikan setelah ditambahkan filter *hybrid*.

Tabel 4.39 Data Hasil Simulasi Harmonisa Setelah Pemasangan Filter *Hybrid*

From Bus ID	To Bus ID	Nominal kV	THDi %	THDv %
Bus1	HSB-SS2-01B	11	0.85	1.95
Bus2	Bus9	11	1.40	1.97
Bus3	Bus10	11	1.41	1.97
Bus4	Bus11	11	1.46	1.97
Bus5	Bus12	11	1.65	1.97
Bus6	HSB-SS2-01B	11	1.91	1.97
Bus9	MV-CP-004A	11	1.39	1.97
Bus10	MV-CP-004A	11	1.02	1.97
Bus11	MV-CP-004A	11	1.06	1.97
Bus12	MV-CP-004A	11	1.53	1.97
Bus13	Bus14	11	0.57	1.97
Bus14	Bus92	0.4	0.60	1.18
Bus15	MCC-CP-006 BUS C	0.4	0.00	1.17
Bus16	MV-CP-004B	11	0.00	1.17
Bus19	Bus72	11	1.91	1.95
Bus21	Bus74	11	1.91	1.95
Bus22	HSB-SS1-01A	0.4	1.03	1.27
Bus23	HSB-SS1-01B	0.4	1.03	1.27
Bus25	Bus71	11	1.74	1.95
Bus26	Bus75	11	1.43	1.95
Bus28	MV-CP-004A	11	1.53	1.97
Bus31	Bus28	11	1.65	1.97
Bus33	HSB-SS6-01A	11	6.74	2.01
Bus34	HSB-SS6-01A	11	3.79	2.04
Bus35	HSB-SS6-01B	11	3.79	2.04
Bus36	HSB-SS6-01B	11	3.79	2.04
Bus37	HSB-SS6-01B	11	3.79	2.04
Bus38	HSB-SS6-01B	11	3.79	2.04
Bus39	HSB-SS6-01B	0.4	1.04	1.28

Tabel 4.39 Data Hasil Simulasi Harmonisa Setelah Pemasangan Filter *Hybrid* (Lanjutan)

From Bus ID	To Bus ID	Nominal kV	THDi %	THDv %
Bus40	HSB-SS2-01A	11	1.43	1.95
Bus41	Bus97	11	1.43	1.95
Bus43	HSB-SS5-01	0.4	1.23	1.61
Bus44	HSB-SS7-01A	11	6.73	2.03
Bus47	HSB-SS7-01A	11	6.74	1.98
Bus49	HSB-SS7-01A	11	3.59	2.03
Bus54	HSB-SS7-01B	0.4	1.03	1.27
Bus55	HSB-SS2-01A	11	1.43	1.95
Bus56	HSB-SS7-01A	11	3.59	2.03
Bus61	HSB-SS7-01B	11	3.59	2.02
Bus62	HSB-SS7-01B	11	3.59	2.02
Bus63	HSB-SS7-01B	11	6.74	2.00
Bus64	HSB-SS7-01B	11	6.74	2.00
Bus67	Bus1	0.4	0.88	1.07
Bus68	Bus55	0.4	1.43	1.26
Bus69	Bus40	0.4	1.43	1.26
Bus71	Bus25	0.4	1.74	1.50
Bus72	Bus19	0.4	1.91	1.64
Bus73	Bus6	0.4	1.91	1.64
Bus74	Bus21	0.4	1.91	1.64
Bus75	Bus26	0.4	1.43	1.26
Bus79	HSB-SS5-01	11	3.80	2.01
Bus80	HSB-SS5-01	0.4	1.24	1.58
Bus81	HSB-SS4-01	11	1.25	2.02
Bus83	HSB-SS27-01	11	3.31	2.01
Bus87	MCC-CP-006B	0.4	0.00	1.17
Bus90	HSB-SS6-01A	11	3.79	2.04
Bus91	HSB-SS6-01A	11	3.79	2.04
Bus92	MCC-CP-006A	0.4	0.60	1.17
Bus97	Bus41	0.4	1.43	1.26
HSB-SS1-01A	MV-CP-004A	11	1.49	1.97
HSB-SS1-01B	HSB-SS2-02B	11	3.59	1.97

Tabel 4.39 Data Hasil Simulasi Harmonisa Setelah Pemasangan Filter *Hybrid* (Lanjutan)

From Bus ID	To Bus ID	Nominal kV	THDi %	THDv %
HSB-SS2-01A	HSB-SS1-01A	11	1.43	1.95
HSB-SS2-01B	HSB-SS1-02	11	1.43	1.95
HSB-SS2-02A	HSB-SS1-01A	11	0	1.97
HSB-SS2-02B	HSB-SS1-01B	11	0	1.97
HSB-SS3-01	HSB-SS1-02	11	5.16	2.00
HSB-SS4-01	Bus81	11	2.40	2.02
HSB-SS5-01	HSB-SS1-01A	11	7.92	1.98
HSB-SS6-01A	HSB-SS1-01A	11	1.04	1.99
HSB-SS6-01B	HSB-SS6-01A	11	3.79	1.99
HSB-SS7-01A	HSB-SS1-01A	11	6.21	1.98
HSB-SS7-01B	HSB-SS7-01A	11	1.03	1.98
MCC-1P-007	MCC-CP-006A	0.4	0.42	1.16
MCC-2CP-007 (ENGINE-2).	MCC-CP-006A	0.4	0.41	1.16
MCC-3CP-007 (ENGINE-3).	MCC-CP-006A	0.4	0.41	1.16
MCC-CP-006A	MCC-1P-007	0.4	0.42	1.17
MCC-CP-006B	MCC-CP-006A	0.4	2.13	1.17
MCC-CP-006C	MCC-CP-006B	0.4	0.80	1.17
MCC-CP-008	MCC-CP-006A	0.4	0.47	1.17
MV-CP-004A	HSB-SS1-01A	11	0.57	1.97
MV-CP-004B	Bus16	11	0	1.17
Cable61~	MCC-CP-006 BUS C	0.4	0	1.17
Cable62~	MCC-CP-006 BUS C	0.4	0	1.17
Cable63~	MCC-CP-006 BUS C	0.4	0	1.17
Cable12~	HSB-SS1-01B	11	0	1.97
Cable23~	HSB-SS1-01B	11	0	1.97

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Setelah dilakukan proses simulasi dan analisis pemasangan filter *hybrid* pada Proyek Pakistan Deep Water Containeer Port maka selama proses tersebut penulis dapat mengambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Penempatan pemasangan filter *hybrid* telah sesuai, yaitu pada bus yang terdapat didalam *Network* SS-6 dan SS-7. Bus-bus tersebut merupakan sumber utama harmonisa pada *plant* tersebut. Sehingga setelah pemasangan filter, didapatkan hasil yang maksimal dalam peredaman harmonisa dan sesuai dengan standar IEEE 519-1992.
2. Perhitungan spesifikasi filter telah sesuai, hal tersebut dapat dibuktikan bahwa sebelum dipasang filter nilai $THD_v = 20.74\%$ dan $THD_i = 46.88\%$ pada *network* SS-6 sedangkan pada *Network* SS-7 nilai $THD_v = 20.66$ dan $THD_i = 45.11$. Setelah dilakukan perhitungan dan pemasangan filter *hybrid*, nilai harmonik tersebut turun menjadi $THD_v = 1.99\%$ dan $THD_i = 7.93\%$ pada *Network* SS-6. Sedangkan pada *Network* SS-7 nilai $THD_v = 1.98\%$ dan $THD_i = 6.22\%$. Selain itu, pemasangan filter juga mampu meningkatkan nilai *Power Factor* dari 93.7% menjadi 100% serta dari 92.1 menjadi 99.1% (pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A).
3. Pemasangan filter pada *Network* SS-6 hanya mampu untuk menurunkan harmonisa tegangan (THD_v) saja. Sehingga perlu pemasangan filter pada *Network* SS-7 untuk menurunkan nilai harmonisa arus (THD_i).
4. Pemasangan filter *hybrid* perlu dilakukan pada *plant* tersebut, karena dengan pemasangan filter pasif saja belum mampu untuk menurunkan nilai harmonisa arus (THD_i) pada *Network* SS-7 sesuai dengan standar IEEE 519-1992.
5. Filter *hybrid* yang dipasang pada *plant* ini berupa filter pasif yang kinerjanya dikombinasikan dengan filter aktif. Simulasi pemasangan filter aktif di *plant* ini dikonversikan dalam bentuk VFD baru dan dipasang pada motor dengan kapasitas terbesar.

5.2 Saran

Dalam usaha untuk menyelesaikan tugas akhir ini, saran yang dapat diberikan untuk kedepannya antara lain :

1. Untuk mengatasi harmonisa yang terjadi pada Proyek Pakistan Deep Water Containeer Port, pemasangan filter *hybrid* pada tugas akhir ini dapat digunakan sebagai referensi dan pertimbangan bagi perusahaan yang bersangkutan.
2. Berdasarkan hasil simulasi, tingkat peredaman harmonisa akan lebih maksimal apabila filter aktif dipasang pada semua VFD yang ada pada plant tersebut. Namun dengan alasan untuk mencari nilai yang ekonomis maka filter aktif dipasang hanya pada VFD pada motor terbesar saja. Oleh karena itu perlu dilakukan studi lebih lanjut terkait hal tersebut.
3. Tugas akhir ini dapat digunakan sebagai referensi maupun pembandingan oleh mahasiswa atau peneliti untuk melakukan studi dalam hal yang berkaitan dengan filter harmonisa maupun filter *hybrid*.



Halaman ini sengaja dikosongkan

HYBRID FILTER PLANNING STUDY FOR REDUCING HARMONIC IN PAKISTAN DEEP WATER CONTAINER PORT PROJECT

Name : Rahman Efandi
NRP : 2211 100 022
Advisor I : Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.
Advisor II : Ir. R. Wahyudi

ABSTRACT

Pakistan Deep Water Container Port is a project construction of a container port in the city of Karachi, Pakistan. As one of the largest ports in Pakistan, Pakistan Deep Water Container Port must have a number of targets in the process of loading and unloading cargo ships, both in local and international scale per-day. Therefore necessary motors for doing it. One way to operate the motor in order to work optimally and efficiently by adjusting the motor speed using a VFD (Variable Frequency Drive). However, the use of VFD in which there are non linear components, this can cause problems harmonics, which the frequency of the generated power will affect the quality of the existing electrical system and can cause damage to the equipment, such as: transformers and cables. To prevent that necessary to study planning the installation of filters to muffle frequency harmonics that arise. In this final project will be designed a hybrid filter to reduce harmonics caused by the presence of motor load mounted on Pakistan Deep Water Container Port. Here also conducted studies of various cases to get the best results in the placement of the filter including passive and active, in order to obtain maximum circumstances in reducing harmonics. For the active filter modeling on software Powersim whereas passive filters and filter hybrid performed on software ETAP 11.0.0.

Keywords: active filter, harmonics, hybrid filter, passive filter



KATA PENGANTAR

Alhamdulillah Robbil 'Alamin, terucap syukur kehadiran Allah atas limpahan rahmat dan karunia yang tak terkira berupa kekuatan, kesabaran, dan kelancaran sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini. Adapun tujuan dari penyusunan tugas akhir ini adalah untuk menyelesaikan salah satu persyaratan mendapatkan gelar sarjana teknik pada bidang studi Teknik Sistem Tenaga, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Dalam kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang banyak berjasa terutama dalam penyusunan tugas akhir ini, yaitu :

1. Segenap keluarga, terutama Ibu dan Bapak serta Kakak tercinta yang selalu memberikan dukungan, semangat, dan doa untuk keberhasilan penulis.
2. Bapak Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT dan Bapak Ir. R. Wahyudi selaku dosen pembimbing yang telah banyak memberikan saran serta bimbingannya.
3. Seluruh rekan E-51 atas kebersamaan dan kerjasamanya selama 4 tahun ini.
4. Seluruh rekan UPT Grha atas dukungan, semangat, bantuan, kebersamaan, dan kerjasama selama ini.
5. Seluruh keluarga besar Teknik Elektro ITS, para dosen, karyawan, mahasiswa, serta rekan-rekan HIMATEKTRO atas dukungan, masukan, dan kerjasamanya selama masa kuliah dan proses pengerjaan tugas akhir.

Besar harapan penulis agar tugas akhir ini dapat memberikan manfaat dan masukan bagi banyak pihak. Oleh karena itu penulis mengharapkan kritik, koreksi, dan saran dari pembaca yang bersifat membangun untuk pengembangan ke arah yang lebih baik.

Surabaya, Juni 2015

Penulis



DAFTAR ISI

	HALAMAN
JUDUL	
LEMBAR PERNYATAAN	
LEMBAR PENGESAHAN	
ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xv
 BAB 1 PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Permasalahan	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Batasan Masalah	2
1.5 Metodologi	2
1.6 Sistematika	3
1.7 Relevansi dan Manfaat	4
 BAB 2 KONSEP DAYA, HARMONISA DAN FILTER	
HARMONISA	
2.1 Konsep Daya	5
2.1.1 Permasalahan Faktor Daya	7
2.1.2 Perbaikan Faktor Daya	8
2.2 Harmonisa	9
2.2.1 Metode Fourier Perhitungan Harmonisa	10
2.2.2 <i>Total Harmonic Distortion (THD)</i>	12
2.2.3 <i>Total Demand Distortion (TDD)</i>	13
2.2.4 Sumber-sumber Harmonisa	13
2.2.4.1 Konverter	13
2.2.4.2 Tanur Busur Listrik	14
2.2.4.3 Transformator	14
2.2.4.4 Mesin-Mesin Berputar	16
2.2.5 Pengaruh yang Ditimbulkan oleh Harmonisa	16
2.2.5.1 Rugi-Rugi pada Saluran Transmisi dan Kabel	17

2.2.5.2	Pengaruh Pada Faktor Daya.....	17
2.2.5.3	Pengaruh Terhadap Sistem Proteksi	18
2.2.5.4	Pengaruh pada Mesin-Mesin Berputar.....	18
2.2.5.5	Pengaruh Terhadap Transformator	20
2.3	Filter Harmonisa	20
2.3.1	Filter Pasif.....	21
2.3.2	Filter Aktif	21
2.3.2.1	Kontrol PI	23
2.3.2.2	<i>Pulse Widht Modulation (PWM)</i>	23
2.3.2.3	Inverter Tiga Fasa	24

BAB 3 SISTEM KELISTRIKAN PROYEK PAKISTAN DEEP WATER CONTAINER PORT

3.1	Sistem kelistrikan Pakistan Deep Water Container Port.....	25
3.2	Pembangkitan dan Pembebanan Proyek Pakistan Deep Water Container port.....	26
3.3	Sistem Distribusi pada Proyek Pakistan Deep Water Container Port.....	27
3.3.1	<i>Composite Network SS-1</i>	27
3.3.2	<i>Composite Network MCC-CP-006</i>	28
3.4	Sumber Harmonisa pada Proyek Pakistan Deep Water Container Port.....	30
3.5	Langkah-langkah Peredaman Harmonisa pada Proyek Pakistan Deep Water Container Port.....	31

BAB 4 SIMULASI DAN ANALISIS

4.1	Simulasi Aliran Daya pada Sistem Kelistrikan Proyek Pakistan Deep Water Container Port.....	34
4.2	Simulasi Harmonisa pada Sistem Kelistrikan Proyek Pakistan Deep Water Container Port.....	35
4.2.1	Distorsi Harmonisa Terhadap Tegangan	40
4.2.1.1	Harmonisa Tegangan pada Network SS-6.....	41
4.2.1.2	Harmonisa Tegangan pada Network SS-7	42
4.2.2	Distorsi Harmonisa Terhadap Arus	44
4.2.2.1	Harmonisa Arus pada Network SS-6	45
4.2.2.2	Harmonisa Arus pada Network SS-7	46
4.3	Pemasangan dan Perhitungan Spesifikasi Filter Pasif	47
4.3.1	Perhitungan dan Pemasangan Filter Pasif Orde 5 pada Network SS-6.....	48

4.3.2	Perhitungan dan Pemasangan Filter Pasif Orde 7 pada Network SS-6.....	51
4.3.3	Perhitungan dan Pemasangan Filter Pasif Orde 11 pada Network SS-6.....	54
4.3.4	Perhitungan dan Pemasangan Filter Pasif Orde 17 pada Network SS-6.....	57
4.3.5	Perhitungan dan Pemasangan Filter Pasif Orde 23 pada Network SS-6.....	60
4.3.6	Perhitungan dan Pemasangan Filter Pasif Orde 5 pada Network SS-7.....	63
4.3.7	Perhitungan dan Pemasangan Filter Pasif Orde 7 pada Network SS-7.....	66
4.3.8	Perhitungan dan Pemasangan Filter Pasif Orde 11 pada Network SS-7.....	69
4.3.9	Perhitungan dan Pemasangan Filter Pasif Orde 17 pada Network SS-7.....	72
4.3.10	Perhitungan dan Pemasangan Filter Pasif Orde 23 pada Network SS-7.....	75
4.4	Pemasangan dan Perhitungan Spesifikasi Filter Pasif.....	78
4.4.1	Rangkaian Filter Aktif pada Psim.....	79
4.4.1	Simulasi dan Pemasangan Filter Aktif.....	80
4.4.1.1	Konversi Data Karakteristik VFD dari ETAP ke Psim.....	80
4.4.1.2	Hasil Simulasi Filter Aktif pada Psim.....	81
4.4.1.3	Konversi Data VFD Baru dari Psim ke ETAP.....	82
4.4.1.4	Hasil Simulasi Filter Hybrid pada ETAP.....	83
4.5	Perbandingan Setelah Pemasangan Filter Hybrid.....	86

BAB 5 PENUTUP

5.1	Kesimpulan	91
5.2	Saran	92

DAFTAR PUSTAKA	93
-----------------------------	----

RIWAYAT HIDUP PENULIS	95
------------------------------------	----



DAFTAR TABEL

	HALAMAN
Tabel 2.1 Batas distorsi harmonisa untuk sistem distribusi 120 V sampai 69 kV berdasarkan IEEE Std 519-1992.....	12
Tabel 2.2 Batas distorsi tegangan berdasarkan IEEE Std 519-1992.....	13
Tabel 3.1 Data Kapasitas Pembangkit.....	26
Tabel 3.2 Data Kapasitas Pembangkit.....	26
Tabel 3.3 Data Transformator Distribusi pada Proyek Pakistan Deep Water Container Port.....	28
Tabel 3.4 Data Beban Motor 11 kV pada Proyek Pakistan Deep Water Container Port.....	29
Tabel 3.5 Data VFD pada Motor Sebagai Penghasil Harmonik	30
Tabel 4.1 Data Hasil Simulasi Aliran Daya pada Bus Generator	34
Tabel 4.2 Data Hasil Simulasi Aliran Daya pada Bus Penyulang Utama (<i>Main Bus</i>)	34
Tabel 4.3 Data Hasil Simulasi Aliran Daya pada <i>Network</i> SS-6 dan SS-7 (Bus Harmonisa)	34
Tabel 4.4 Data Hasil Simulasi Harmonisa Tanpa Filter	37
Tabel 4.5 Batas Nilai Harmonisa Tegangan Sesuai IEEE STD 519-1992.....	40
Tabel 4.6 Persentase Harmonisa Terhadap Tegangan Fundamental di Orde Tertentu pada bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS6-01B.....	41
Tabel 4.7 Persentase Harmonisa Terhadap Tegangan Fundamental di Orde Tertentu pada bus HSB-SS7-01A dan HSB-SS7-01B.....	42
Tabel 4.8 Batas Nilai Harmonisa Arus Sesuai IEEE STD 519-1992.....	44
Tabel 4.9 Persentase Harmonisa Terhadap Arus Fundamental Orde Tertentu pada cable 11.....	45
Tabel 4.10 Persentase Harmonisa Terhadap Arus Fundamental Orde Tertentu pada cable 22.....	46
Tabel 4.11 Persentase Harmonisa Terhadap Tegangan Fundamental pada Orde Tertentu Setelah Pemasangan Filter Orde 5	49
Tabel 4.12 Persentase Harmonisa Terhadap Arus Fundamental pada Orde Tertentu Setelah Pemasangan Filter Orde 5	49

Tabel 4.13	Persentase Harmonisa Terhadap Tegangan Fundamental pada Orde Tertentu Setelah Pemasangan Filter Orde 7	51
Tabel 4.14	Persentase Harmonisa Terhadap Arus Fundamental pada Orde Tertentu Setelah Pemasangan Filter Orde 7 ...	52
Tabel 4.15	Persentase Harmonisa Terhadap Tegangan Fundamental pada Orde Tertentu Setelah Pemasangan Filter Orde 11	54
Tabel 4.16	Persentase Harmonisa Terhadap Arus Fundamental pada Orde Tertentu Setelah Pemasangan Filter Orde 11 .	55
Tabel 4.17	Persentase Harmonisa Terhadap Tegangan Fundamental pada Orde Tertentu Setelah Pemasangan Filter Orde 17	57
Tabel 4.18	Persentase Harmonisa Terhadap Arus Fundamental pada Orde Tertentu Setelah Pemasangan Filter Orde 17 .	58
Tabel 4.19	Persentase Harmonisa Terhadap Tegangan Fundamental pada Orde Tertentu Setelah Pemasangan Filter Orde 23	60
Tabel 4.20	Persentase Harmonisa Terhadap Arus Fundamental pada Orde Tertentu Setelah Pemasangan Filter Orde 23 .	61
Tabel 4.21	Persentase Harmonisa Terhadap Tegangan Fundamental pada Orde Tertentu Setelah Pemasangan Filter Orde 5	63
Tabel 4.22	Persentase Harmonisa Terhadap Arus Fundamental pada Orde Tertentu Setelah Pemasangan Filter Orde 5 ...	64
Tabel 4.23	Persentase Harmonisa Terhadap Tegangan Fundamental pada Orde Tertentu Setelah Pemasangan Filter Orde 7	66
Tabel 4.24	Persentase Harmonisa Terhadap Arus Fundamental pada Orde Tertentu Setelah Pemasangan Filter Orde 7 ...	67
Tabel 4.25	Persentase Harmonisa Terhadap Tegangan Fundamental pada Orde Tertentu Setelah Pemasangan Filter Orde 11	69
Tabel 4.26	Persentase Harmonisa Terhadap Arus Fundamental pada Orde Tertentu Setelah Pemasangan Filter Orde 11 .	70
Tabel 4.27	Persentase Harmonisa Terhadap Tegangan Fundamental pada Orde Tertentu Setelah Pemasangan Filter Orde 17	72

Tabel 4.28	Persentase Harmonisa Terhadap Arus Fundamental pada Orde Tertentu Setelah Pemasangan Filter Orde 17..	73
Tabel 4.29	Persentase Harmonisa Terhadap Tegangan Fundamental pada Orde Tertentu Setelah Pemasangan Filter Orde 23	75
Tabel 4.30	Persentase Harmonisa Terhadap Arus Fundamental pada Orde Tertentu Setelah Pemasangan Filter Orde 23..	76
Tabel 4.31	Data Beban <i>Non Linier</i> (kiri) dan Parameter Filter Aktif (kanan).....	79
Tabel 4.32	Hasil Persentase Harmonisa Sebelum dan Setelah Simulasi Filter Aktif	82
Tabel 4.33	Persentase Harmonisa Terhadap Tegangan Fundamental pada Orde Tertentu Setelah Pemasangan Filter hybrid.....	83
Tabel 4.34	Persentase Harmonisa Terhadap Arus Fundamental pada Orde Tertentu Setelah Pemasangan Filter <i>hybrid</i>	84
Tabel 4.35	Perbandingan antara menggunakan filter pasif dan filter <i>hybrid</i>	86
Tabel 4.36	Data Hasil Simulasi Aliran Daya pada Bus Generator Setelah pemasangan filter <i>Hybrid</i>	86
Tabel 4.37	Data Hasil Simulasi Aliran Daya pada <i>Network</i> SS-6 dan SS-7 (Bus Harmonisa) Setelah pemasangan filter Hybrid.....	86
Tabel 4.28	Data Hasil Simulasi Aliran Daya pada <i>Network</i> SS-6 dan SS-7 (Bus Harmonisa) Setelah pemasangan filter Hybrid.....	86
Tabel 4.29	Data Hasil Simulasi Harmonisa Setelah Pemasangan Filter <i>Hybrid</i>	87



Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

	HALAMAN
Gambar 2.1 Segitiga Daya	6
Gambar 2.2 Diagram Fasor Daya	8
Gambar 2.3 Gelombang Sinusoidal Arus dan Tegangan	9
Gambar 2.4 Gelombang Fundamental	9
Gambar 2.5 Gelombang Harmonik Ketiga	10
Gambar 2.6 Gelombang Hasil Penjumlahan Fundamental dan Harmonik	10
Gambar 2.7 Magnetisasi Transformator (tanpa histerisis) meliputi: Kurva Magnetisasi, Bentuk Gelombang Fluks dan Arus Magnetisasi	15
Gambar 2.8 Rangkaian ekivalen Motor Induksi Untuk Harmonik Ke-n	19
Gambar 2.9 Berbagai tipe Rangkaian Filter Pasif.....	21
Gambar 2.10 Rangkaian Filter Aktif	22
Gambar 3.1 <i>Single Line Diagram</i> Sistem Kelistrikan Utama Proyek Pakistan Deep Water Container Port	25
Gambar 3.2 <i>Flowchart</i> Pengerjaan Tugas Akhir	32
Gambar 4.1 Simulasi Harmonisa pada <i>Network</i> SS-6	35
Gambar 4.2 Simulasi Harmonisa pada <i>Network</i> SS-7	36
Gambar 4.3 Diagram Harmonisa Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS6-01B	41
Gambar 4.4 Gelombang Harmonisa Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS6-01B.....	42
Gambar 4.5 Diagram Harmonisa Tegangan pada Bus HSB-SS7-01A dan HSB-SS7-01B	43
Gambar 4.6 Gelombang Harmonisa Tegangan pada Bus HSB-SS7-01A dan HSB-SS7-01B.....	43
Gambar 4.7 Diagram Harmonisa Arus pada Bus Cable 11.....	45
Gambar 4.8 Gelombang Harmonisa Arus pada Bus Cable 11.....	46
Gambar 4.9 Diagram Harmonisa Arus pada Bus Cable 22.....	47
Gambar 4.10 Gelombang Harmonisa Arus pada Bus Cable 22.....	47
Gambar 4.11 Diagram Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 5.....	49
Gambar 4.12 Gelombang Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 5.....	50

Gambar 4.13	Diagram Arus pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 5.....	50
Gambar 4.14	Gelombang Arus pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 5	50
Gambar 4.15	Diagram Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 7	52
Gambar 4.16	Gelombang Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 7	53
Gambar 4.17	Gelombang Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 7	53
Gambar 4.18	Gelombang Arus pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 7	53
Gambar 4.19	Diagram Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 11 ...	56
Gambar 4.20	Gelombang Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 11 ...	56
Gambar 4.21	Gelombang Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 11 ...	56
Gambar 4.22	Gelombang Arus pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 11 ...	56
Gambar 4.23	Diagram Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 17 ...	58
Gambar 4.24	Gelombang Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 17. ...	59
Gambar 4.25	Gelombang Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 17 ...	59
Gambar 4.26	Gelombang Arus pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 17 ..	59
Gambar 4.27	Diagram Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 23. ...	61
Gambar 4.28	Gelombang Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 23. ...	62
Gambar 4.29	Gelombang Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 23 ...	62
Gambar 4.30	Gelombang Arus pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 23 ..	62
Gambar 4.31	Diagram Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 5	64

Gambar 4.32	Gelombang Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 5.....	65
Gambar 4.33	Diagram Arus pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 5.....	65
Gambar 4.34	Gelombang Arus pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 5.....	65
Gambar 4.35	Diagram Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 7.....	67
Gambar 4.36	Gelombang Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 7.....	68
Gambar 4.37	Gelombang Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 7.....	68
Gambar 4.38	Gelombang Arus pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 7.....	68
Gambar 4.39	Diagram Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 11	70
Gambar 4.40	Gelombang Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 11	71
Gambar 4.41	Gelombang Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 11	71
Gambar 4.42	Gelombang Arus pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 11	71
Gambar 4.43	Diagram Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 17	73
Gambar 4.44	Gelombang Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 17	74
Gambar 4.45	Gelombang Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 17	74
Gambar 4.46	Gelombang Arus pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 17 ...	74
Gambar 4.47	Diagram Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 23....	76
Gambar 4.48	Gelombang Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 23....	77
Gambar 4.49	Gelombang Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 23....	77
Gambar 4.50	Gelombang Arus pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 23...	77
Gambar 4.51	Pemodelan Rangkaian Filter Aktif pada Psim.	79

Gambar 4.52	Konversi Data Karakteristik VFD dari ETAP ke Psim	80
Gambar 4.53	Bentuk Gelombang dan Diagram Karakteristik VFD yang terdapat pada ETAP	81
Gambar 4.54	Bentuk Gelombang Karakteristik VFD yang terdapat pada Psim.....	81
Gambar 4.55	Bentuk Gelombang Setelah Running Simulasi	81
Gambar 4.56	Konversi Data Magnitude VFD baru dari Psim ke ETAP.	83
Gambar 4.57	Diagram Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter <i>hybrid</i>	84
Gambar 4.58	Gelombang Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter <i>hybrid</i>	84
Gambar 4.59	Diagram Arus pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter <i>hybrid</i>	85
Gambar 4.60	Gelombang Arus pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter <i>hybrid</i>	85

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Stevenson W.D, “*Electrical Power System Analysis*”, Fourth Edition, McGraw-Hill, London, 1993.
- [2]. Roger C. Dugan, “*Electrical Power System Quality*”, McGraw-Hill, New York, 1996.
- [3]. Hutaeruk T.S, “*Analisa Sistem Tenaga Listrik*”, Jilid I, Bandung, 1992.
- [4]. Margo Pujiantara, “*Penyempurnaan Desain Filter Harmonisa Menggunakan Kapasitor Eksisting Pada Pabrik Soda Kaustik di Serang-Banten*”, JAVA Journal of Electrical and Electronics Engineering, Vol. 1, No. 2, Oct 2003, ISSN 1412-8306.
- [5]. IEEE, “*Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*”, 1987. IEEE Std.519-1992
- [6]. Arrillaga.J, N.R. Watson. “*Power System Harmonics*”, Second Edition John Wiley & Sons Inc, 2003.
- [7]. Akagi H., “*Modern active filters and traditional passive filters*”, Bulletin of the polish academy of sciences technical sciences, vol.54, no.3, 2006.
- [8]. Angelo Baghini, “*Handbook of Power Quality*”, John Wiley & Sons, Inc, 2008.
- [9]. Ahmed M. Mohammed., “*Analysis and Simulation of Shunt Active Filter for Harmonic Cancellation of Non Linear Loads*”. Engineer & Technology Journal Vol.28 No.16, 2010.
- [10].Jonathan Herson Ruben, Rony Seto Wibowo, dan Ontoseno Penangsang, “*Analisis Unjuk Kerja Filter Pasif dan Filter Aktif pada Sisi Tegangan Rendah di Perusahaan Semen Tuban, Jawa Timur*”, JURNAL TEKNIK POMITS Vol. 1, No. 1, 2012.

BIODATA PENULIS



Rahman Efandi, dilahirkan di Kota Surabaya, Jawa Timur pada 7 Juni 1992. Penulis memulai jenjang pendidikan di SDN Rangkah 8 Surabaya, SMPN 1 Surabaya, dan SMAN 2 Surabaya hingga lulus pada tahun 2011. Pada tahun itu pula penulis melanjutkan pendidikan ke jenjang perguruan tinggi di Teknik Elektro Institut Teknologi Sepuluh Nopember melalui jalur SNMPTN. Selama kuliah, penulis aktif sebagai staf di Departemen Kewirausahaan HIMATEKTRO 2012-2013. Penulis juga pernah aktif dalam kegiatan kepanitiaan seperti LCEN 2013 dan LCEN 2014. Selain kegiatan organisasi, penulis juga aktif bidang keilmiahan. Penulis dapat dihubungi melalui email efandi.rahman11@mhs.ee.its.ac.id.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Penggunaan beban non linier akhir-akhir ini semakin meningkat mulai dari peralatan rumah tangga hingga industri. Idealnya, gelombang arus bolak-balik murni adalah berbentuk sinusoidal. Namun dengan adanya pembebanan non linier bentuk gelombang tersebut terdistorsi sehingga tidak berbentuk sinusoidal lagi. Beban non linier tersebut menjadi sumber distorsi yang dapat merusak gelombang fundamental yang ada. Fenomena tersebut sering disebut dengan harmonisa. Pada sistem tenaga listrik, terjadinya fenomena harmonisa merupakan hal yang merugikan karena dapat mengakibatkan rusaknya peralatan yang ada, seperti : transformator dan kabel. Beban non linier yang dapat menimbulkan harmonisa antara lain : *Variable Frequency Drive (VFD)*, *Uninterruptible Power Supply (UPS)*, lampu *fluorescent*, *Charger* baterai, komputer dan berbagai macam konverter.

Pakistan Deep Water Container Port merupakan salah satu pelabuhan terbesar di Pakistan. Pelabuhan ini cukup aktif melayani bongkar-muat peti kemas sehari-harinya, baik domestik maupun internasional. Diperlukan kontinuitas yang tinggi dalam unit ini, maka dari itu dibutuhkan VFD untuk mengatur kecepatan motor yang disesuaikan oleh jumlah proses bongkar-muat yang diinginkan. VFD merupakan salah satu sumber harmonisa. VFD digunakan pada saat *starting* motor dengan tujuan untuk memperkecil arus *starting* yang dihasilkan oleh motor tersebut. Berdasarkan data yang diambil pada plant tersebut, didapat distorsi harmonisa sebesar 20.7% padahal batas nilai distorsi harmonisa yang diijinkan menurut standar IEEE 519-1992 adalah sebesar 5%. Sehingga diperlukan pemasangan filter untuk meredam harmonisa tersebut.

Pada umumnya jenis filter yang digunakan untuk mengurangi harmonisa adalah jenis filter pasif dikarenakan harganya yang relatif murah. Namun pada beberapa kondisi, penggunaan filter pasif belum cukup untuk mengurangi distorsi harmonisa yang ada. Oleh karena itu, pada tugas akhir ini difokuskan pada pemodelan filter pasif dan filter aktif atau sering disebut dengan filter *hybrid* untuk mengurangi harmonisa yang terjadi pada Proyek Pakistan Deep Water Container Port.

1.2 Permasalahan

Permasalahan yang dibahas dalam tugas akhir ini adalah bagaimana mengurangi harmonisa yang terjadi pada Proyek Pakistan Deep Water Container Port yang disebabkan oleh penggunaan beban non linier berupa *Variable Frequency Drive* (VFD) pada bus tertentu dengan pemasangan filter *hybrid*, sehingga didapat nilai distorsi harmonisa yang sesuai dengan standar IEEE 519-1992.

1.3 Tujuan

Tugas Akhir ini memiliki tujuan untuk melaksanakan studi mengenai harmonisa dan perencanaan filter yang sesuai untuk diterapkan pada Proyek Pakistan Deep Water Container Port. Dengan pemasangan filter tersebut, diharapkan dapat meredam frekuensi harmonisa yang terjadi dan mampu meningkatkan kualitas daya serta kinerja sistem pada *plant* tersebut.

1.4 Batasan Masalah

Pada pengerjaan tugas akhir ini terdapat batasan masalah agar tidak menyimpang dari ketentuan yang telah dibuat, antara lain :

1. Pemodelan dan simulasi sistem kelistrikan Proyek Pakistan Deep Water Container Port menggunakan *software* ETAP 11.0.
2. Analisa pemodelan dan simulasi harmonisa dilakukan pada kondisi normal (*steady state*).
3. Peredaman harmonisa dengan filter pasif menggunakan *software* ETAP 11.0.
4. Pemodelan kinerja dari filter aktif menggunakan *software* Powersim.

1.5 Metodologi

Metode yang digunakan untuk penyelesaian kasus dalam tugas akhir ini diawali dengan pengumpulan dan melengkapi data *single line diagram* (SLD), *datasheet* peralatan, dan referensi-referensi ilmiah. Data-data yang terkumpul ini selanjutnya memasuki tahap pemodelan sistem menggunakan *software* ETAP 11.0. Pemodelan ini menganalisis aliran daya dan harmonisa yang terjadi pada sistem kelistrikan di Proyek Pakistan Deep Water Container Port. Dari analisis aliran daya dilihat kondisi faktor daya sistem kelistrikannya, terutama pada bagian *main substation*, sedangkan dari analisis harmonisa dilihat besarnya distorsi

harmonisa yang terjadi pada bus-bus yang berdekatan dengan sumber harmonisa berupa VFD, karena pada umumnya darisanalah sumber frekuensi harmonisa terjadi. Dengan analisis tersebut didapatkan orde harmonisa yang dominan terjadi pada bus-bus yang ingin dianalisis, kemudian digunakan untuk mendesain filter pasif sebagai peredaman harmonisa yang terjadi dan mengkompensasi daya reaktif untuk perbaikan faktor daya pada bus-bus tersebut di *main substation*. Setelah perhitungan dan pemodelan dilakukan, akan didapatkan nilai parameter kapasitor (C), induktor (L) dan resistor (R) beserta tipe dari filter pasif yang paling sesuai untuk diterapkan pada *plant* tersebut. Ternyata pemasangan filter pasif belum dapat meredam seluruh sumber harmonisa. Oleh karena itu, perlu penambahan filter aktif pada sistem. Pemodelan filter aktif dilakukan dengan membuat rangkaian filter aktif pada *software* Powersim kemudian dimasukkan parameter sumber harmonisa yang ada, dalam hal ini yang dimasukkan adalah parameter *magnitude* dari VFD. Setelah itu dilihat bagaimana hasil kinerja filter aktif tersebut terhadap distorsi sumber harmonisa. Setelah hasil respon diketahui, kemudian dikonversikan kembali dalam bentuk *Variable Frequency Drive* (VFD) yang baru. VFD baru tersebut merupakan VFD yang telah diberikan filter aktif. VFD baru tersebut selanjutnya dimasukkan kembali ke sumber harmonisa yang ada pada ETAP. Selanjutnya dilakukan simulasi analisis harmonisa dengan menggunakan filter *hybrid* tersebut (filter pasif dan filter aktif) pada ETAP hingga didapatkan hasil yang maksimal dalam peredaman harmonisa.

Dengan menggunakan filter *hybrid* ini diharapkan dapat memperoleh keadaan yang efisien dan maksimal dalam meredam harmonisa agar sesuai dengan standar IEEE 519-1992. Setelah itu tahapan tugas akhir ini dilanjutkan dengan kesimpulan, sehingga perancangan filter *hybrid* ini dapat menjadi rekomendasi untuk diaplikasikan pada Proyek Pakistan Deep Water Container Port.

1.6 Sistematika

Tugas akhir ini disusun dengan sistematika sebagai berikut :

BAB I : Pendahuluan

Dalam bab ini membahas tentang penjelasan mengenai latar belakang, rumusan masalah, tujuan, Batasan masalah, sistematika penulisan, metodologi, sistematika penulisan dan relevansi.

BAB II : Dasar Teori

Dalam bab ini secara garis besar membahas tentang teori penunjang mengenai harmonisa, studi aliran daya dan pemodelan filter *hybrid*.

BAB III : Sistem Kelistrikan Proyek Pakistan Deep Water Container Port

Dalam bab ini membahas tentang pemodelan sistem kelistrikan yang terdapat pada Proyek Pakistan Deep Water Container Port, meliputi : pembangkit, beban, sumber harmonisa dan metodologi peredaman distorsi harmonisa.

BAB IV : Simulasi dan Analisis

Dalam bab ini berisikan tentang hasil analisis dari proses simulasi mengenai peredaman harmonisa menggunakan filter *hybrid* yang telah dilakukan.

BAB V : Penutup

Dalam bab ini berisi tentang kesimpulan dan saran dari pembahasan yang telah dilakukan.

1.7 Relevansi dan Manfaat

Hasil yang diperoleh dari Tugas Akhir ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut :

1. Dapat menjadi bahan rekomendasi untuk diterapkan pada Proyek Pakistan Deep Water Container Port.
2. Dapat meningkatkan penguasaan IPTEK di bidang harmonisa dan peningkatan kualitas daya.
3. Sebagai referensi bagi peneliti atau mahasiswa mengenai studi perancangan filter *hybrid*.

BAB II

FAKTOR DAYA, HARMONISA DAN FILTER HARMONISA

2.1 Konsep Daya

Daya yang diserap oleh suatu beban adalah drop tegangan (Volt) pada beban tersebut dikalikan dengan arus (Ampere) yang mengalir melalui beban tersebut [1]. Studi analisis harmonisa sangat berpengaruh dengan analisis aliran daya. Oleh karena itu, dibutuhkan penjelasan dasar mengenai konsep daya untuk membantu menyelesaikan masalah harmonisa. Pada dasarnya, terdapat dua definisi umum mengenai faktor daya. Pertama faktor daya didefinisikan sebagai *cosinus* dari sudut beda fasa antara tegangan dan arus yang menyatakan arus tertinggal atau mendahului tegangan. Kedua, faktor daya didefinisikan sebagai rasio antara daya aktif dengan daya total, definisi kedua inilah yang pada umumnya lebih sering digunakan di dalam konsep sistem tenaga listrik. Nilai faktor daya bervariasi antara 0 s/d 1. Nilai faktor daya pada umumnya juga dinyatakan pada persen. Untuk lebih jelasnya mengenai faktor daya, Berikut dijelaskan konsep pembagian daya listrik, daya dibagi menjadi tiga, yaitu :

a. Daya Reaktif

Merupakan daya listrik yang dihasilkan oleh beban-beban yang bersifat reaktansi. Terdapat dua jenis beban reaktansi, yaitu reaktansi induktif dan reaktansi kapasitif. Beban – beban akan menyerap daya reaktif untuk menghasilkan medan magnet. Contoh beban listrik induktif adalah transformator. Sedangkan contoh beban listrik kapasitif adalah kapasitor.

b. Daya Aktif

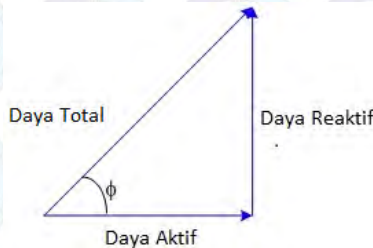
Merupakan daya listrik yang digunakan secara nyata, misalnya untuk menghasilkan panas, cahaya atau putaran pada motor listrik. Daya nyata dihasilkan oleh beban-beban listrik yang bersifat resistif murni. Besarnya daya nyata sebanding dengan kuadrat arus listrik yang mengalir pada beban resistif dan dinyatakan dalam satuan Watt.

c. Daya Total

Daya total merupakan penjumlahan dari daya aktif dan daya reaktif. Satuan dari daya total adalah VA. Daya total disebut juga daya kompleks didapat dari hasil kali antara besarnya tegangan dan arus listrik yang mengalir pada beban.

Hubungan antara ketiga daya tersebut, daya reaktif, daya aktif dan daya total pada suatu tegangan (V) adalah sebanding dengan arus (I) dan dinyatakan sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \text{Daya Total (VA)} &= \sqrt{(\text{Daya Aktif})^2 + (\text{Daya Reaktif})^2} \\ I_t &= \sqrt{(V.I. \cos \phi)^2 + (V.I. \sin \phi)^2} \end{aligned} \quad (2.1)$$



Gambar 2.1 Segitiga Daya

Berdasarkan gambar segitiga daya diatas terdapat sudut ϕ diantara daya total dan daya aktif. Perbandingan sudut itulah yang disebut dengan faktor daya atau $\cos \phi$. Faktor daya dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \text{Faktor daya} &= \frac{\text{Daya rata-rata}}{(\text{Tegangan rms} \times \text{Arus rms})} \\ &= \frac{\text{Daya aktif}}{\text{Daya total}} = \frac{KW}{KVA} \end{aligned} \quad (2.2)$$

Untuk gelombang dengan bentuk tidak sinusoidal dan terdapat harmonisa pada gelombang tersebut, maka nilai faktor daya akan berbanding lurus dengan bentuk gelombang fundamentalnya. Berikut adalah persamaan nilai sesaat dari tegangan dan arus :

$$V = \sum_1^n \sqrt{2} V_n \sin(n\omega t - \alpha_n) + \sum_1^m \sqrt{2} I_n \sin(n\omega t - \alpha_m) \quad (2.3)$$

$$I = \sum_1^n \sqrt{2} I_n \sin(n\omega t + \alpha_n + \phi_n) + \sum_1^m \sqrt{2} I_n \sin(n\omega t - \alpha_m) \quad (2.4)$$

Sehingga faktor dayanya adalah :

$$PF = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T v i dt}{V_{rms} I_{rms}} = \frac{\sum_1^n V_n I_n \cos \phi_n}{\{(\sum_1^n V_n^2 + \sum_1^n V_n^2)(\sum_1^n I_n^2 + \sum_1^p I_p^2)\}^{1/2}} \quad (2.5)$$

Jika bentuk tegangan sinuoidal maka persamaan tersebut dapat disederhanakan menjadi : [2]

$$PF = \frac{V_1 I_1 \cos \phi_1}{V_1 I_{rms}} = \frac{I_1}{I_{rms}} \cos \phi_1 = \mu \cos \phi_1 \quad (2.6)$$

Dimana :

μ = faktor distorsi arus

$\cos \phi_1$ = *displacement factor* antara komponen fundamental dari arus dan tegangan

Nilai faktor daya akan tinggi ketika $\mu = 1$ karena $\cos \phi_1$ tidak dapat lebih besar dari 1. Apabila dilihat dari hubungan diatas terlihat bahwa penyaluran akan sangat baik jika digunakan nilai faktor daya yang bernilai maksimum atau mendekati 1.

Nilai faktor daya dapat bersifat mendahului (*leading*) atau tertinggal (*lagging*). Pada umumnya suatu industri biasanya hanya faktor daya beban yang diperhitungkan. Faktor daya akan bersifat *leading* apabila beban menghasilkan daya reaktif (Var). Apabila arah daya aktif dan reaktif sama maka faktor dayanya bersifat *lagging*. Namun apabila arahnya berlawanan maka faktor dayanya bersifat *leading*.

2.1.1 Permasalahan Faktor Daya

Daya listrik selalu akan mengalir menuju beban, karena itu dalam hal ini aliran daya juga memerlukan aliran beban [3]. Pengoperasian beban-beban listrik seperti : transformator daya, motor induksi dan beban jenis konverter lain akan menarik arus magnetisasi dari jaringan sistem tenaga listrik sehingga mengakibatkan berkurangnya faktor kerja dan membutuhkan daya reaktif yang cukup besar. Hal ini sangat merugikan dikarenakan :

- Menurunnya efisiensi peralatan sistem tenaga seperti : transformator daya dan penghantar dikarenakan menurunnya faktor kerja akan menambah besar arus yang melalui peralatan tersebut dan menambah rugi-rugi daya.
- Perbedaan tegangan listrik pada kondisi beban ringan dan beban penuh yang relatif besar, hal tersebut berakibat pada pengaturan tegangan menjadi buruk.
- Pada instalasi listrik dengan batasan arus dan daya tertentu, akan memerlukan kapasitas yang lebih besar dari kapasitas normal.

2.1.2 Perhitungan Perbaikan Faktor Daya

Untuk menangani permasalahan mengenai faktor daya maka berdasarkan uraian penjelasan mengenai faktor daya diatas, dapat disusun persamaan perbaikan faktor daya yang dapat ditulis sebagai berikut :

$$\cos \varphi = \frac{\text{Daya aktif}}{\text{Daya total}} = \frac{\text{KW}}{\text{KVA}} \quad (2.7)$$

$$\tan \varphi = \frac{\text{Daya reaktif}}{\text{Daya aktif}} = \frac{\text{KVar}}{\text{KW}} \quad (2.8)$$

Karena komponen daya aktif umumnya konstan (komponen KVA dan Kvar berubah sesuai dengan faktor daya), maka dapat ditulis sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \text{Daya reaktif} &= \text{Daya aktif} \times \tan \varphi \\ Q &= (P \times \tan \varphi) \text{ Kvar} \end{aligned} \quad (2.9)$$

Penurunan rumus untuk mencari *rating* yang sesuai dibutuhkan untuk memperbaiki faktor daya beban, Persamaannya adalah sebagai berikut :

Daya reaktif pada PF awal

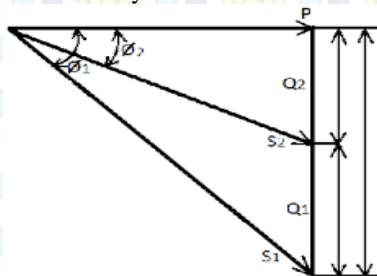
$$Q_1 = P_1 \times \tan \varphi_1$$

Daya reaktif pada PF yang diperbaiki

$$Q_2 = P_2 \times \tan \varphi_2$$

(2.10)

Dimana nilai $P_2 = P_1 = \text{daya aktif}$



Gambar 2.2 Diagram Fasor Daya

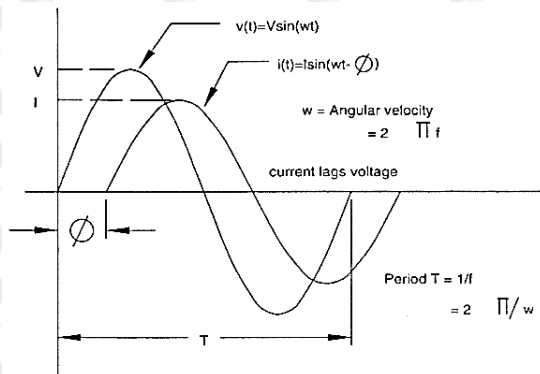
Berdasarkan gambar 2.2 dapat diketahui hubungan antara daya aktif (P) dengan daya reaktif (Q) serta daya total (S). Sehingga perhitungan spesifikasi kapasitor yang diperlukan untuk perbaikan faktor daya adalah sebagai berikut :

$$\text{Daya reaktif } (\Delta Q) = Q_1 - Q_2$$

$$\text{Daya reaktif } (\Delta Q) = P \times (\tan \theta_1 - \tan \theta_2) \quad (2.11)$$

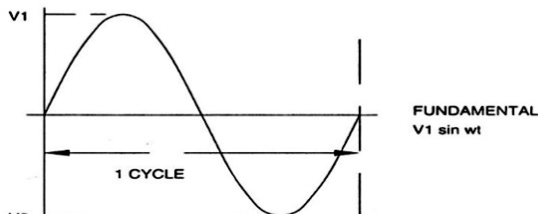
2.2 Harmonisa

Harmonisa pada sistem tenaga listrik dapat dikatakan sebagai cacat gelombang akibat adanya interferensi gelombang lain yang memiliki frekuensi kelipatan bilangan *integer* dari frekuensi fundamentalnya [4]. Hal tersebut terjadi akibat adanya pembebanan non linier pada sistem. Harmonisa dapat menimbulkan kerugian pada sistem tersebut karena terjadi distorsi pada frekuensi fundamental. Akibat terjadinya harmonisa seperti : menurunnya kinerja dari peralatan, terjadi pemanasan pada peralatan secara berlebihan dan penurunan kualitas daya pada sistem tersebut. Berikut adalah gambar gelombang arus dan gelombang tegangan.

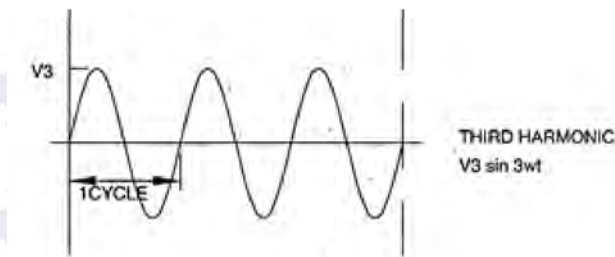


Gambar 2.3 Gelombang Sinusoidal Arus dan Tegangan

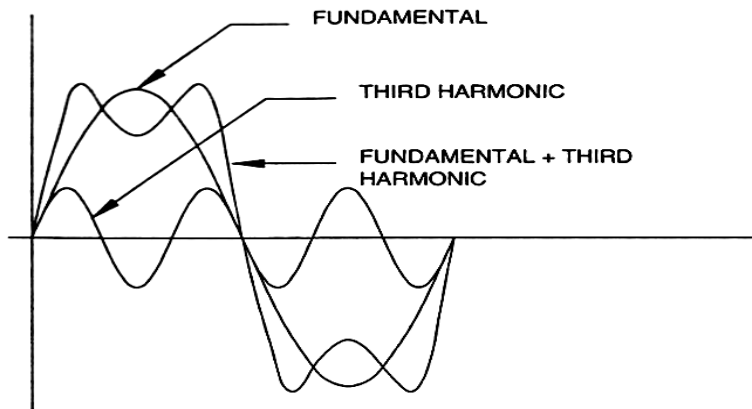
Pengaruh yang ditimbulkan akibat adanya pengoperasian beban harmonik adalah gelombang fundamental yang sebelumnya berbentuk sinusoidal, akan terdistorsi menjadi tidak sinusoidal. Hal ini terjadi akibat adanya penjumlahan dari gelombang sinusoidal fundamental dengan gelombang sinusoidal dari harmonisa yang terjadi. Berikut adalah penjelasan gambar mengenai gelombang harmonik :



Gambar 2.4 Gelombang Fundamental



Gambar 2.5 Gelombang Harmonik Ketiga



Gambar 2.6 Gelombang Hasil Penjumlahan Fundamental dan Harmonik

2.2.1 Metode Fourier Perhitungan Harmonisa

Pada Tahun 1822 J.B.J. Fourier, seorang ahli matematika dan fisika untuk pertama kalinya memperkenalkan teori *Fourier Series* lewat artikelnya yang berjudul “*Analitic Theory of Heat*”. Joseph Fourier juga menuliskan bahwa setiap fungsi kontinu berulang dalam interval T dapat diwakili oleh penjumlahan dari DC komponen, komponen sinusoidal fundamental, dan serangkaian komponen sinusoidal orde tinggi (harmonisa) pada frekuensi yang merupakan kelipatan integer dari frekuensi fundamental.

Analisis harmonisa adalah proses perhitungan *magnitude* dan fase dari gelombang periodik frekuensi fundamental dan orde tinggi. Deret Fourier menunjukkan hubungan antara fungsi domain-waktu dan fungsi domain frekuensi. Berdasarkan metode Fourier, suatu fungsi periodik dapat diuraikan menjadi fungsi-fungsi sinusoidal dengan frekuensi, *amplitude* dan sudut fasa tertentu apabila memenuhi syarat-syarat sebagai berikut :

- Merupakan fungsi periodik $f(\omega t) = f(\omega t + T)$ dengan T = periode
- Merupakan fungsi kontinu atau fungsi tak kontinu dengan jumlah ketidak-kontinyuan yang tertentu selama satu periode
- Selama selang periode, fungsi harus mempunyai harga rata-rata tertentu
- Dalam satu periode T , fungsi harus mempunyai harga maksimum atau minimum yang jumlahnya tertentu.

Apabila syarat-syarat diatas telah terpenuhi maka, fungsi dapat diuraikan menjadi deret Fourier dengan persamaan sebagai berikut :

$$f(\omega t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \quad (2.11)$$

dengan

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_0^T f(\omega t) d(\omega t) \quad (2.12)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(\omega t) \cos(n\omega t) d(\omega t) \quad (2.13)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(\omega t) \sin(n\omega t) d(\omega t) \quad (2.14)$$

Untuk mempercepat penyederhanaan analisa Fourier, dapat digunakan sifat-sifat khusus gelombang sebagai berikut :

- Apabila luas siklus positif dan negatif adalah sama dalam satu periode, maka $a_0 = 0$.
- Apabila $f(\omega t) = -f(\omega t + \frac{T}{2})$ atau fungsi mempunyai simetri pada setengah gelombang positif dan negatif, maka akan muncul harmonik orde ganjil.
- Apabila $f(\omega t) = f(-\omega t)$ atau fungsi genap, maka $b_n = 0$.
- Apabila $f(\omega t) = -f(-\omega t)$ atau fungsi ganjil, maka $a_n = 0$.

2.2.2 Total Harmonic Distortion (THD)

Nilai *Total Harmonic Distortion* (THD) digunakan untuk menentukan nilai harmonisa yang terjadi pada suatu sistem tenaga listrik. Nilai THD juga menyatakan jumlah tegangan atau arus yang terdistorsi. Pada sistem tenaga listrik *Total Harmonic Distortion* (THD) didefinisikan sebagai persentase total komponen harmonisa terhadap komponen fundamentalnya. Batas nilai (persentase) THD dari tegangan dan arus maksimal ini didasarkan sesuai dengan standar dari IEEE Std 519-1992.

$$THD = \frac{\left[\sum_{n=2}^k U_n^2 \right]^{\frac{1}{2}}}{U_1} \times 100\% \quad (2.15)$$

dengan :

- U_n : komponen harmonisa
- U_1 : komponen fundamental
- k : komponen harmonisa maksimum yang diamati

Tabel 2.1 Batas distorsi harmonisa untuk sistem distribusi 120 V sampai 69 kV berdasarkan standar IEEE 519-1992 [5]

Distorsi Harmonisa Arus Maksimum dalam Persen terhadap I_L						
Isc/I _L	Orde Harmonisa Individual (Harmonisa Orde Ganjil)					
	<11	11≤h≤17	17≤h≤23	23≤h≤35	35≤h	TDD
<20*	4	2	1,5	0,6	0,3	5
20-50	7	3,5	2,5	1	0,5	8
50-100	10	4,5	4	1,5	0,7	12
100-1000	12	5,5	5	2	1	15
>1000	15	7	6	2,5	1,4	20
Harmonisa orde genap dibatasi 25% dari Harmonisa orde ganjil di atas.						
Tidak diperbolehkan distorsi arus yang dihasilkan sistem DC, contohnya converter setengah gelombang.						
*Semua peralatan pembangkit listrik terbatas pada nilai-nilai distorsi arus terlepas dari Isc/I _L aktual.						
dimana :						
Isc = Arus hubung singkat maksimum pada PCC						
I _L = Arus beban maksimum (komponen frekuensi fundamental) pada PCC						

Tabel 2.1 diatas merupakan batas distorsi harmonisa arus yang diijinkan sesuai dengan standar IEEE 519-1992. Untuk batas distorsi harmonisa tegangan tersaji pada tabel 2.2.

Tabel 2.2 Batas distorsi tegangan berdasarkan IEEE Std 519-1992 [5]

Tegangan Bus Pada PCC	Distorsi Tegangan Individual (%)	THD (%)
69 kV dan ke bawah	3	5
69,001 kV sampai 161 kV	1,5	2,5
161,001 kV dan ke atas	1	1,5

Perhitungan nilai tegangan distorsi (THD_v) dan arus distorsi (THD_i) dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan berikut :

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \quad \text{dan} \quad THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \quad (2.16)$$

2.2.3 Total Demand Distortion (TDD) [5]

Total Demand Distortion merupakan perbandingan nilai rms antara komponen arus harmonisa dengan arus beban *demand* maksimum. Pada saat beban penuh $THD_i = TDD$, maka TDD merupakan besar distorsi arus pada sistem. Perhitungan nilai TDD adalah sesuai persamaan berikut:

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_L} \quad (2.17)$$

2.2.4 Sumber-Sumber Harmonisa

Pada umumnya, terjadinya harmonisa disebabkan karena pengoperasian beban non linier. Berdasarkan klasifikasi pembebanan pada sistem tenaga listrik dibedakan menjadi beban linier dan non linier. Beban linier adalah beban yang memiliki nilai arus berbanding secara linier terhadap tegangan beban. Sehingga pada beban linier nilai gelombang arus akan sama dengan nilai gelombang tegangan beban. Karakteristik beban non linier berbeda dengan beban linier, yaitu bentuk gelombang yang ditarik oleh beban non linier ini tidak berbentuk sinusoidal tetapi periodik. Hal tersebut menyebabkan nilai arus tidak sama dengan nilai gelombang tegangan, sehingga terjadi harmonisa.

2.2.4.1 Konverter

Konverter dapat menimbulkan terjadinya distorsi gelombang, hal tersebut dikarenakan di dalam konverter mengandung komponen *switching*. Konverter merupakan peralatan elektronika daya yang berfungsi untuk mengkonversi sumber masukan menjadi sumber keluaran yang diinginkan. Beberapa peralatan yang mengandung konverter adalah:

- a. *Uninterruptible Power Supply* (UPS).
- b. Lampu *flourescent*, dimmer.
- c. *Charger* baterai.
- d. *Variable Frequency drive* (VFD).
- e. Perangkat elektronik untuk rumah tangga (TV, *microwave*, pemanas).
- f. Komputer.

2.2.4.2 Tanur Busur Listrik (*Electric Arc Furnace*)

Electric Arc Furnace merupakan peralatan utama pada industri pengecoran logam atau pembuatan besi baja. Tanur busur listrik berfungsi untuk melebur biji besi dalam industri logam. Tanur busur listrik adalah elemen beban non linier dan biasanya merupakan sumber harmonisa arus terbesar diantara sumber-sumber harmonisa yang lain. Selain menyebabkan harmonisa, *Electric Arc Furnace* juga banyak menyebabkan permasalahan lain dalam lingkup kualitas daya. Permasalahan tersebut seperti :

- a. Distorsi harmonik
- b. Kedip tegangan (*flicker*)
- c. Ketidakseimbangan tegangan
- d. Gangguan goncangan frekuensi

Selama *arc furnace* beroperasi, hampir selalu tidak dalam keadaan stabil. Hal ini disebabkan oleh pengaruh perubahan elektroda, interaksi gaya elektromagnetik busur dan pengaruh riak permukaan biji yang telah melebur. Bentuk gelombang arus tanur busur listrik pada setiap periode gelombang mempunyai bentuk yang tidak sama sehingga bentuk gelombang arus dari *arc furnace* bukanlah bersifat periodik. Oleh karena itu, dalam hal ini tidak bisa dibuat persamaan gelombangnya. Level arus pada yang diakibatkan oleh *arc furnace* bergantung pada referensi yang ditentukan.

2.2.4.3 Transformator

Peralatan-peralatan yang mengalami saturasi seperti transformator dan peralatan elektromagnetik lainnya dengan inti besi, termasuk juga motor-motor (mesin-mesin berputar) merupakan sumber harmonik. Harmonik tersebut dibangkitkan oleh karakteristik magnetisasi besi yang non linier.

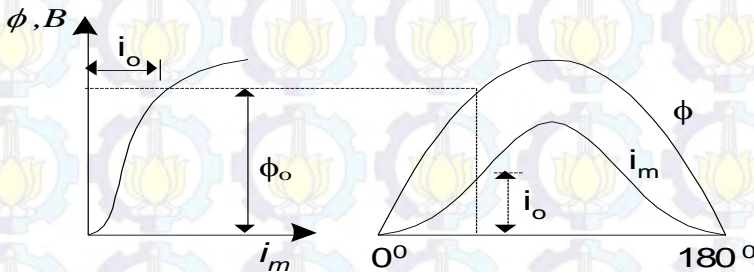
Pada saat transformator tidak berbeban, tegangan primer trafo sebanding dengan *Electromotive Force* (EMF) balik karena efek resistansi belitan dan reaktansi bocor diabaikan pada arus rendah. Tegangan tersebut dapat dinyatakan dengan :

$$e_1 = -N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad (2.18)$$

Dari persamaan di atas dapat diperoleh rata-rata fluks :

$$\phi = -\int \frac{e_1}{N_1} dt = \frac{E_m}{N_1 \omega} \sin \omega t = \phi_m \sin \omega t \quad (2.19)$$

Berarti bahwa tegangan primer yang sinusoidal akan menghasilkan fluks yang sinusoidal pula pada keadaan transformator tidak berbeban. Pada inti ideal tanpa rugi-rugi histerisis, hubungan fluks dan arus magnetisasi I_m ditentukan oleh kurva magnetisasi bahan besi yang digunakan didalam laminasinya seperti terlihat pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Magnetisasi Transformator (tanpa histerisis) meliputi :
Kurva Magnetisasi, Bentuk Gelombang Fluks dan Arus Magnetisasi

Suatu cara yang tepat untuk menangani harmonisa pada transformator adalah dengan memperlengkapi sambungan netral. Jadi dengan demikian sambungan netral adalah salah satu solusi untuk meredam harmonisa pada sistem Y-Y. Tetapi selain manfaat tersebut, pada beberapa jenis sambungan transformator, sambungan netral juga menghasilkan keuntungan-keuntungan sebagai berikut :

1. Sebagai jalur bagi arus yang tidak seimbang karena beban tidak seimbang.

2. Untuk memperkecil atau mengurangi kenaikan pada tegangan fasa yang tidak terganggu apabila ada salah satu fasa yang mengalami gangguan tanah (hubung singkat ke tanah).

2.2.4.4 Mesin-Mesin Berputar

Motor induksi dan generator sinkron pada umumnya dapat menghasilkan sejumlah harmonik. Pada generator sinkron, harmonik disebabkan oleh kejenuhan dan distribusi fluks yang tidak sinusoidal sehingga terbangkit *Electromotive Force* (EMF) yang tidak sinusoidal yang akan menghasilkan arus harmonik bila dibebani.

Upaya yang dilakukan untuk menekan tingkat distorsi sampai sekecil mungkin sehingga dapat diabaikan pada pembuatan generator sinkron adalah dengan memperhatikan hal-hal berikut, diantaranya :

- a) Sudut konduktor kumparan (*coil pitch*) dibuat kurang dari 180° listrik. Hal ini dimaksudkan untuk mengurangi magnitudo harmonik.
- b) Distribusi kerapatan *fluks* pada celah udara dibuat mendekati sinusoidal.
- c) Menggunakan hubungan Y pada stator sehingga tidak muncul harmonik ketiga pada terminal generator.

2.2.5 Pengaruh yang Ditimbulkan oleh Harmonisa

Pada umumnya besar-kecilnya pengaruh yang ditimbulkan oleh harmonisa bergantung pada nilai sumber harmonisa, letak sumber harmonisa dan karakteristik sistem jaringan kelistrikan yang digunakan. Akibat yang terjadi karena efek harmonik dapat diklasifikasikan menjadi dua, yaitu efek seketika (*instantaneous effects*) dan efek jangka panjang (*long-term effects*). Kategori yang termasuk pada efek seketika, contohnya adalah mengganggu pengoperasian kontroler pada sistem elektronik. Harmonik juga dapat menyebabkan salah pembacaan (*missreading*) pada pengukuran peralatan besaran listrik. Gelombang terdistorsi pada saluran menimbulkan interferensi pada saluran komunikasi dan rangkaian kontrol atau monitoring.

Pada efek jangka panjang (*long-term effects*) yang sering terjadi adalah *overheating*, misalnya pada kapasitor, mesin-mesin listrik maupun transformator terjadi karena adanya rugi-rugi energi tambahan akibat harmonik. Pada kabel dan peralatan, rugi-rugi energi tambahan ini disebabkan oleh bertambahnya nilai rms arus untuk daya aktif yang sama. bertambahnya resistansi inti adalah sebanding dengan naiknya frekuensi.

2.2.5.1 Rugi-rugi pada Saluran Transmisi dan Kabel

Pengaruh yang terjadi pada saluran transmisi dan kabel adalah berupa bertambahnya rugi-rugi transmisi yang disebabkan oleh meningkatnya nilai rms gelombang arus. Berikutnya aliran arus harmonisa juga menyebabkan terjadinya drop tegangan diantara rangkaian impedansi. Akibatnya kabel dan isolator lainnya akan mengalami *stress* tegangan berlebih dan korona. Hal tersebut dapat menyebabkan kegagalan isolasi bahkan mempercepat penuaan (*aging*). Dari segi pengukuran juga dapat terjadi kesalahan. Alat ukur yang bekerja berdasarkan induksi seperti : *watt-hour meter*, dirancang dan dikalibrasi untuk gelombang sinus. Harmonisa membangkitkan tambahan kopel atau *torque electromagnetic* pada *disk*, sehingga hasil pengukurannya menjadi lebih tinggi. Berikut adalah persamaan rugi-rugi transmisi yang disebabkan karena peningkatan nilai rms arus akibat harmonisa :

$$\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2 R \quad (2.20)$$

In merupakan nilai arus harmonik ke-n dan R adalah resistansi sistem.

2.2.5.2 Pengaruh Pada Faktor Daya

Pada umumnya beban-beban listrik dari suatu sistem tenaga listrik mempunyai faktor kerja *lagging* atau bersifat induktif. Beban-beban tersebut antara lain motor-motor induksi, trafo daya, beban konverter dan lain-lain menarik arus magnetisasi dari jaringan sehingga beban-beban tersebut membutuhkan daya reaktif dari jaringan sistem tenaga listrik. Apabila kebutuhan daya reaktif sangat besar, maka dapat mengakibatkan faktor daya menjadi makin kecil, sedangkan berkurangnya faktor daya dapat menimbulkan berbagai kerugian baik pada pihak pembangkit maupun pihak konsumen.

Adapun kerugian pada pihak konsumen antara lain :

- a. Perbedaan tegangan listrik pada kondisi beban ringan dan beban penuh relatif besar. Hal ini berarti pengaturan tegangan menjadi buruk.
- b. Instalasi listrik dengan pembatasan arus tertentu dan untuk melayani daya tertentu (kW) akan memerlukan kapasitas yang lebih besar.

Kerugian pihak pembangkit adalah sebagai berikut :

- a. Menurunnya efisiensi peralatan, seperti transformator daya dan jaringan penghantar. Dalam hal ini untuk daya aktif yang sama, menurunnya faktor daya akan menambah besar arus yang melalui peralatan tersebut, sehingga rugi-rugi daya akan bertambah besar. Dengan demikian efisiensi peralatan akan menurun.
- b. Drop tegangan akan menjadi lebih besar.

2.2.5.3 Pengaruh terhadap Sistem Proteksi

Pengaruh harmonisa pada sistem proteksi dapat berupa salah satu pembacaan pada peralatan sehingga sistem proteksi bekerja tidak sesuai dengan *setting* yang telah ditentukan dapat mengakibatkan gangguan pengamanan. Hal ini sangatlah berbahaya karena dengan terjadinya kesalahan proteksi akibat harmonik yang timbul, akan menggagalkan pengamanan peralatan apabila terjadi gangguan. Beberapa pengaruh lain diantaranya adalah :

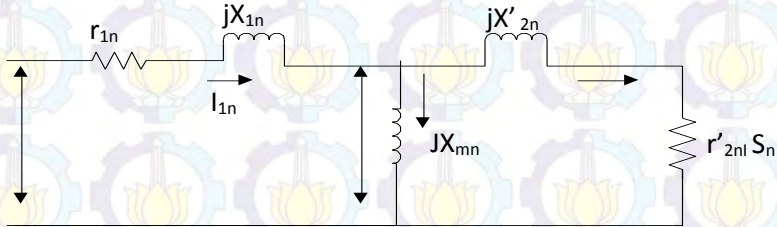
1. Terjadinya penurunan *rating* akibat pemanasan yang timbul.
2. Terjadinya peningkatan panas dan rugi-rugi pada komponen *switchgear* yang akan menyebabkan penurunan kemampuan mengalirkan arus sehingga dapat mempersingkat umur dari komponen isolator.
3. Timbul getaran mekanis pada panel listrik yang merupakan getaran resonansi mekanis akibat harmonisa frekuensi tinggi.
4. Dengan timbulnya harmonisa dapat memberi tambahan torsi pada kWh-meter yang berjenis elektromagnetis piringan berputar. Akibatnya akan terjadi kesalahan pengukuran karena piringan akan berputar lebih cepat.
5. Triplen harmonisa pada kawat netral dapat memberikan induksi harmonisa yang mengganggu sistem telekomunikasi.
6. *Circuit breaker* akan bekerja tidak sesuai dengan *setting* karena CB akan bekerja di bawah arus pengenalnya bahkan mungkin tidak bekerja pada arus pengenal.

2.2.5.4 Pengaruh Pada Mesin-Mesin Berputar

Harmonisa berpengaruh pada mesin berputar seperti : motor dan generator. Hal tersebut disebabkan karena tegangan dan arus harmonisa menimbulkan penambahan rugi-rugi pada belitan stator dan rotor serta laminasi pada stator dan rotor. Untuk menghasilkan tingkat distorsi yang

sekecil mungkin sehingga dapat diabaikan dalam pembuatan generator sinkron memperhatikan hal-hal sebagai berikut :

- Distribusi kerapatan *fluks* pada celah udara dibuat mendekati sinusoidal.
- Sudut konduktor kumparan (*coil pitch*) dibuat kurang dari 180° listrik. Hal ini dimaksudkan untuk mengurangi *magnitude* harmonik.



Gambar 2.8 Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi Untuk Harmonik Ke-n

Rangkaian penyederhanaan (ekivalen) yang paling umum pada mesin induksi digambarkan pada Gambar 2.8. Pada gambar diatas resistansi *core* (R_c) diabaikan karena memiliki arus yang kecil.

Semua parameter diatas berhubungan dengan frekuensi dari arus belitan. Arus harmonik timbul pada stator mesin AC menghasilkan aksi motor slip harmonik positif, S_n . Aksi motor ini menghasilkan torsi *shaft* pada arah sesuai dengan kecepatan medan harmonik sehingga semua harmonik urutan positif memperkuat torsi poros sedangkan harmonik urutan negatif bertindak sebaliknya.

Untuk harmonik I_n torsi perfasa dinyatakan sebagai

$$T_n = \left(\frac{I_n^2}{n} \right) \left(\frac{r'_{2n}}{S_n} \right) \quad (2.21)$$

apabila S_n mendekati 1 maka persamaan di atas menjadi

$$T_n = \left(\frac{I_n^2}{n} \right) r'_{2n} \quad (2.22)$$

Dengan menggunakan hubungan $V_n = I_n Z_n$ dan $Z_n = nX_l$, torsi dapat dinyatakan dalam bentuk tegangan harmonik yaitu:

$$T_n = \left(\frac{V_n^2}{n^3} \right) \left(\frac{r_{2n}}{X_l^2} \right) \quad (2.23)$$

Karena slip pada frekuensi harmonik mendekati harga satu, maka torsi yang dihasilkan oleh arus harmonik sangat kecil dan juga torsi kecil yang terjadi berpasangan sehingga dapat saling menghilangkan. Oleh karena itu, pengaruh harmonik pada torsi rata-rata pada beberapa kasus dapat diabaikan.

2.2.5.5 Pengaruh Terhadap Transformator

Aliran arus harmonisa akan meningkatkan rugi-rugi histerisis dan arus *Eddy* serta tekanan isolasi pada transformator. Arus urutan nol yang bersirkulasi menyebabkan pemanasan yang berlebih. Dampak langsung yang dirasakan pada transformator ketika terdapat harmonisa adalah bertambahnya temperatur transformator tersebut. Dengan naiknya temperatur tersebut akan menyebabkan kerugian sebagai berikut :

1. Bertambahnya rugi-rugi daya akan mengurangi kapasitas pembebanan transformator.
2. Mengurangi kemampuan arus maksimum.
3. Mengurangi umur dari transformator tersebut.

Untuk mengatasi pemanasan berlebih akibat harmonisa, pada umumnya kapasitas transformator diperbesar dengan tujuan memperbesar kapasitas pendinginan. Akan tetapi, hal ini akan menimbulkan masalah baru karena konduktor yang lebih besar menyebabkan pemanasan yang lebih besar pula akibat harmonisa frekuensi tinggi. Penambahan kapasitas transformator juga akan mengakibatkan bertambahnya arus harmonisa yang mengalir pada sistem.

2.3 Filter Harmonisa

Penggunaan bersama antara filter pasif dan aktif dapat didesain untuk meminimalisasi arus dan tegangan harmonisa dalam sistem tenaga listrik. Dengan penambahan filter harmonisa pada suatu sistem tenaga listrik yang mengandung sumber harmonisa, maka penyebaran arus harmonisa keseluruhan jaringan dapat ditekan sekecil mungkin. Selain itu filter harmonisa pada frekuensi fundamental juga dapat mengkompensasi daya reaktif sehingga dapat dipergunakan untuk memperbaiki faktor daya sistem.

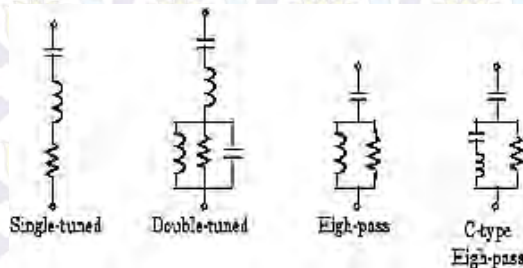
2.3.1 Filter Pasif

Filter pasif merupakan salah satu metode penyelesaian yang umum digunakan di pasaran. Hal tersebut dikarenakan filter pasif memiliki nilai yang lebih ekonomis. Pada umumnya filter pasif berfungsi untuk mengurangi amplitudo satu atau lebih frekuensi tertentu dari sebuah tegangan atau arus melalui jalur yang rendah nilai impedansinya pada frekuensi harmonisa tertentu. Ada dua macam filter pasif yaitu filter pasif seri dan filter pasif paralel. Filter pasif seri memiliki karakteristik sebagai resonansi paralel dan merupakan tipe filter yang bersifat sebagai penghalang, yang memiliki impedansi tinggi pada frekuensi tertentu. Sedangkan filter pasif paralel memiliki karakteristik sebagai resonansi seri dan merupakan filter yang bertipe trap yang memiliki impedansi yang rendah pada frekuensi tertentu.

Filter pasif ini mempunyai beberapa bentuk, berdasarkan susunan rangkaian komponen-komponen penyusunnya. Secara umum filter pasif dapat dibedakan dalam tiga jenis :

- Filter dengan penalaan tunggal (*Single Tuned Shunt Filter*).
- Filter dengan penalaan ganda (*Double Tuned Filter*).
- *High Pass Damp Filter Type*.

Berikut adalah gambar rangkaian filter pasif dari tipe tersebut :



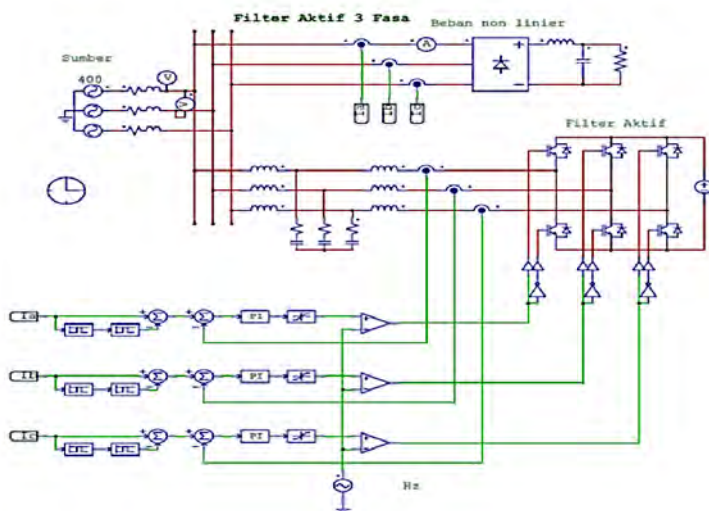
Gambar 2.9 Berbagai Tipe Rangkaian Filter Pasif

2.3.2 Filter Aktif

Filter aktif jika dimodelkan pada sistem dapat berupa seri maupun paralel. Prinsip dasar dari Filter aktif adalah menggunakan teknologi elektronika daya untuk menghasilkan komponen arus spesifik yang bertujuan untuk menggagalkan komponen arus harmonisa yang dihasilkan oleh beban non linier. Prinsip kerja filter aktif seri adalah

berfungsi sebagai penahan arus harmonisa yang berasal dari beban menuju ke sumber. Prinsip kerja filter aktif parallel adalah dengan menyuntikkan atau menginjeksikan arus harmonisa dengan sudut fasa yang berkebalikan dengan arus harmonisa yang dihasilkan oleh beban non linier. Konsep filter aktif dengan PWM (*Pulse Width Modulation*) berbasis inverter yaitu penggunaan arus harmonisa untuk menanggulangi arus harmonisa dari beban non linier yang ada pada sistem tenaga listrik.

Inverter ini menggunakan sumber tegangan dc sebagai *supply* dan dapat melakukan proses *switching* pada frekuensi tinggi untuk menghasilkan sinyal yang mampu mengatasi arus harmonisa yang dihasilkan beban non linier. Penggunaan VSI (*Voltage source Inverter*) untuk memungkinkan pengaturan arus harmonisa pada filter aktif.. Berikut adalah gambar rangkaian dari filter aktif :



Gambar 2.10 Rangkaian Filter Aktif

Rangkaian utama penyusun filter aktif terdiri atas komponen berbasis elektronika daya. Komponen tersebut diantaranya: kontrol PI, inverter tiga fasa dan PWM. Berikut adalah fungsi dari masing-masing komponen pada rangkaian tersebut.

2.3.2.1 Kontrol PI

Komponen ini berfungsi sebagai pereduksi sinyal kesalahan, yaitu perbedaan antara sinyal setting dengan sinyal aktual. Hal tersebut bertujuan untuk mendapatkan sinyal aktual (yang diinginkan) sama dengan sinyal *setting*. Kinerja sistem kontrol tersebut dapat dilihat melalui kondisi sinyal, semakin cepat reaksi dari sistem mengikuti sinyal aktual dan semakin kecil kesalahan maka sistem kontrol tersebut semakin baik kinerjanya.

Kontrol proporsional (K_p) mempunyai keluaran (output) yang sebanding dengan nilai besarnya sinyal kesalahan (selisih antara besaran yang diinginkan dengan nilai aktualnya). Dapat dikatakan output dari kontrol proporsional adalah perkalian antara konstanta proporsional dengan nilai masukannya. Oleh karena itu, apabila terjadi perubahan nilai dari sinyal masukan maka keluaran sistem akan berubah sebesar nilai konstanta pengalinya.

Kontrol integral sebagai penghasil respon sistem yang memiliki kesalahan kondisi *steady state nol*. Dengan kontrol integral, respon sistem dapat diperbaiki dengan mempunyai tingkat kesalahan pada kondisi *steady state nol*.

2.3.2.2 Pulse Width Modulation (PWM)

Sinyal yang akan diolah oleh PWM adalah hasil sinyal dari kontrol PI. Kontrol PI menghasilkan arus referensi (I_{ref}) yang digunakan sebagai masukan PWM. Sinyal referensi ini kemudian dimodulasikan dengan sinyal *carrier (triangular wave)* yang berupa sinyal gigi gergaji. Sinyal *error* ini berbentuk sinusoidal yang akan dimodulasikan dengan sinyal gigi gergaji sebagai sinyal *carrier*. Pada prosesnya, modulasi dilakukan oleh komparator, masukan dari komparator terdiri dari kutub positif dan negatif. Sinyal yang akan dimodulasi dihubungkan pada kutub positif sedangkan kutub negatif dihubungkan ke sinyal *carrier*. Output yang dihasilkan dari komparator berbentuk pulsa *off* dan *on*. Prinsip kerja komparator adalah pulsa keluaran akan *on* apabila sinyal yang dimodulasikan lebih besar atau lebih positif jika dibandingkan dengan sinyal *carrier* serta begitu pula dengan kondisi sebaliknya.

2.3.2.3 Inverter Tiga Fasa

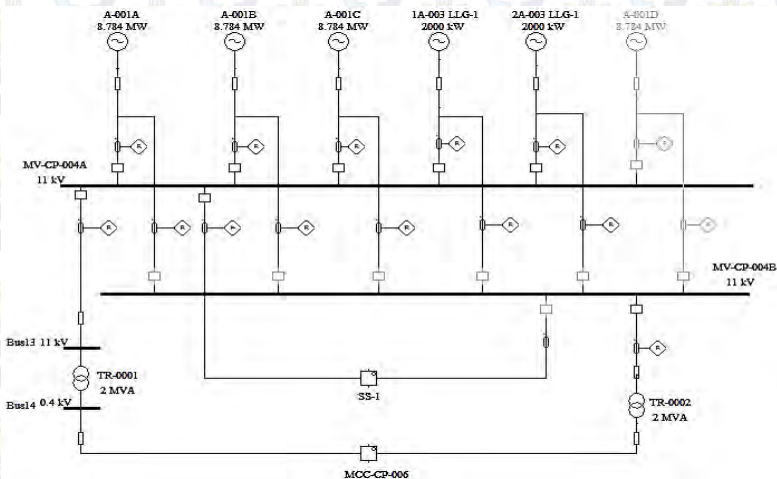
Pada sistem tenaga listrik, fungsi dari inverter adalah menkonversi sumber DC menjadi AC. Hal ini dapat diperoleh dengan adanya pengaturan *switching* pada rangkaian inverter. Pada dasarnya jenis inverter dibagi menjadi dua macam, yakni *Voltage Source Inverter* (VSI) dan *Current Source Inverter* (CSI). VSI menggunakan sumber tegangan sedangkan CSI menggunakan sumber arus. Pada penggunaan filter ini inverter VSI yang umum dipakai adalah berjenis *Sinusoidal Pulse Width Modulation* (SPWM). Penggunaan inverter jenis ini memungkinkan keluaran hasil arus berbentuk sinusoidal serta untuk mengatur frekuensi dan *Magnitude* yang dihasilkan cukup dengan mengontrol rangkaian inverter dengan tegangan sumber yang konstan.

BAB III

SISTEM KELISTRIKAN PROYEK PAKISTAN DEEP WATER CONTAINER PORT

3.1 Sistem Kelistrikan Proyek Pakistan Deep Water Container Port

Pakistan Deep Water Container Port merupakan proyek pembangunan pelabuhan peti kemas yang berada di kota Karachi, Pakistan. Sebagai salah satu pelabuhan terbesar di Pakistan, *Pakistan Deep Water Container Port* harus memenuhi target dalam jumlah proses bongkar-muat kapal-kapal kargo, baik dalam skala lokal maupun internasional per-harinya. Terdapat 7 unit pembangkit yang ada di *Pakistan Deep Water Container Port*. Kapasitas masing-masing pembangkit diantaranya : 4 unit kapasitas 8.784 MW, 2 unit kapasitas 2000 kW dan 1 unit berkapasitas 815 kW. Pembangkit utama terhubung menuju beban melalui 2 bus utama, yaitu : MV-CP-004A dan MV-CP-004A. Pada *plant* ini terdapat 2 buah *network utility* utama, yaitu SS-1 dan MCC-CP-006. Pada *network utility* tersebut, di dalamnya terdapat semua beban yang ada pada *plant* ini. Beban-beban tersebut seperti : motor, *lump*, dsb. Berikut adalah gambar sistem kelistrikan *plant* tersebut:



Gambar 3.1 *Single Line Diagram* Sistem Kelistrikan Utama Proyek Pakistan Deep Water Container Port

3.2 Pembangkitan dan Pembebanan Proyek Pakistan Deep Water Container port

Pembangkit yang terdapat pada Proyek *Pakistan Deep Water Container port* berjumlah 7 unit. Berdasarkan *single line diagram*, terdapat 5 unit pembangkit yang aktif beroperasi sedangkan 2 pembangkit difungsikan sebagai *back-up* ketika kelima generator yang aktif beroperasi tersebut mengalami gangguan dan pada saat starting motor-motor berkapasitas besar yang ada pada plant tersebut. Kapasitas pada masing-masing pembangkit tercantum pada tabel 3.1 berikut :

Tabel 3.1 Data Kapasitas Pembangkit

No	ID	MW	MVar	kV	%PF
1	A-001A (<i>Swing</i>)	8.784	4.821	11	80
2	A-001B (<i>Voltage Control</i>)	8.784	2.812	11	80
3	A-001C (<i>Voltage Control</i>)	8.784	2.812	11	80
4	1A-003 LLG 1 (<i>MVar Control</i>)	2	0.5	11	80
5	2A-003 LLG 1 (<i>MVar Control</i>)	2	0.5	11	80
6	A-001D (<i>Swing Backup</i>)	8.784	0	11	80
7	A-001E (<i>Voltage Control Backup</i>)	0.815	0	11	85

Sedangkan untuk jumlah pembangkitan, pembebanan dan *demand* pada *plant* tersebut dapat dilihat pada Tabel 3.2 berikut :

Tabel 3.2 Data Kapasitas Pembangkit

Nama	MW	Mvar	MVA	%PF
<i>Source (Swing Bus)</i>	22.898	11.887	25.858	88.75 Lag
<i>Source (Non Swing Bus)</i>	0	0	0	-
<i>Total Demand</i>	22.898	11.887	25.858	88.75 Lag
<i>Total Motor Load</i>	21.444	10.69	23.961	89.5 Lag
<i>Total Static Load</i>	1.305	0.937	1.606	81.23Lag

3.3 Sistem Distribusi pada Proyek Pakistan Deep Water Container Port

Pada Proyek *Pakistan Deep Water Container Port*, sistem distribusi yang digunakan adalah bertipe radial. Daya yang dihasilkan dari kelima generator yang aktif beroperasi, yaitu generator A001, A-001B, A-001C, 1A-003 LLG-1, dan 2A-003 LLG-1 disalurkan menuju beban yang terdapat pada *network utility* SS-1 dan MCC-CP-006. Untuk penyaluran daya pada *network utility* SS-1 dilakukan secara langsung dikarenakan berada pada level tegangan yang sama, yakni 11 KV. Sedangkan untuk penyaluran pada *network composite utility* MCC-CP-006, digunakan transformator step-down TR-0001 yang bekerja menurunkan level tegangan dari 11 KV menjadi 0.4 KV. Untuk meningkatkan keandalan dalam proses pendistribusian, pada proyek ini dibuat jalur back-up. Hal tersebut bertujuan agar proses distribusi tetap berjalan ketika salah satu saluran mengalami gangguan.

3.3.1 Composite Network SS-1

Pada *Composite Network* SS1 terdapat beberapa beban dan *Composite Network*. Beban tersebut berupa *Lump Load*, yakni *lump 1* dan *lump 2* yang masing – masing berkapasitas 200 kVA. Untuk menyuplai *Lump Load* tersebut digunakan transformator *step-down* karena beban tersebut berada pada *rating* tegangan 0.4 kV. Selain itu, pada *Composite Network* SS1 juga terdapat *Composite Network* lagi, yakni SS-6, SS7, SS-2 dan SS. Di dalam *network* SS-6 terdapat 8 unit motor induksi yang dikontrol dengan VFD, 6 motor berkapasitas 2000 kW dan 2 motor berkapasitas 700 kW. Penggunaan VFD inilah yang menjadi sumber utama harmonisa pada *plant* ini. Harmonisa yang terjadi pada bus yang ada pada *network* ini mencapai 20.74% untuk tegangan dan 46.88% untuk arus. Nilai tegangan yang ada pada bus yang normalnya 11 kV naik menjadi 11.22 kV. Oleh karena itu, pada bus inilah pemasangan filter *hybrid* difokuskan karena peredaman harmonisa akan maksimal apabila pemasangan filter berada satu bus dengan sumber harmonisa. Selain itu, pada *network* SS-6 juga terdapat *lump load* berkapasitas 250 kVA dan tranformator *step-down* 11 – 0.4 kV untuk menyuplai beban tersebut.

Pada *network* SS-7 terdapat 8 unit motor induksi yang dikontrol dengan VFD, Semua motor tersebut berkapasitas 2000 kW. Pada *network* SS-7 juga terdapat *lump load* berkapasitas 250 kVA dan tranformator *step-down* 11 – 0.4 kV untuk menyuplai beban tersebut. Pada hasil

simulasi harmonisa pada *network* SS-7 didapat THDv sebesar 20.66% dan THDi sebesar 45.11%. Nilai tegangan yang awalnya 11 kV juga naik menjadi 11.22 kV. Selain pada *network* SS-6, pemasangan filter *hybrid* juga difokuskan pada bus yang ada pada *network* SS-7 ini. Diharapkan dengan pemasangan filter pada kedua *network* tersebut (SS-6 dan SS-7) yang merupakan sumber utama harmonisa, mampu meminimalkan atau menghilangkan nilai distorsi harmonisa yang terjadi pada *plant* ini. Di dalam *network* SS-2 terdapat 8 unit motor berkapasitas 150x20 kW pada level tegangan 0.4 kV. Untuk menyuplai beban motor tersebut digunakan transformator *step-down* 11-0.4 kV sebanyak 8 unit. Selain itu, terdapat juga beban berupa *lump load* berkapasitas 315 kVA dan transformator *step-down* 11-0.4 kV untuk menyuplai *lump load* tersebut. Pada *network* SS terdapat 2 unit transformator *step-down* 11-0.4 kV yang digunakan untuk menyuplai beban berupa *lump load* yang berjumlah 2 unit dengan kapasitas masing-masing 1581 kVA dan 1500 kVA.

3.3.2 Composite Network MCC-CP-006

Berdasarkan gambar *single line diagram*, semua beban yang terdapat pada *network* MCC-CP-006 berada pada level tegangan 0.4 kV. Oleh karena itu sebagian besar beban yang berada pada *network* ini berkapasitas kecil. Beban-bekan tersebut terdiri dari lump load, motor, static load dan charger. Rinciannya adalah 2 buah *Induction Machine* kapasitas 15.5 kW, 2 buah *Induction Machine* kapasitas 11 kW, 4 buah *Induction Machine* kapasitas 0.8 kW, 1.6 kW, 37 kW, dan 30 kW. Selain itu terdapat juga beban 6 buah DC *Charger* dan 16 buah beban *static*. Untuk lebih jelasnya, berikut adalah tabel berisikan data dari transformator dan motor yang terdapat pada Proyek *Pakistan Deep Water Container Port*.

Tabel 3.3 Data Transformator Distribusi pada Proyek *Pakistan Deep Water Container Port*

No	ID	MVA	Rating (kV)	%Z	Konfigurasi
1	TR-0001	2	11/0.4	12.5	Delta/Wye
2	TR-0002	2	11/0.4	6	Delta/Wye
3	T1	2.5	11/0.4	6	Delta/Wye
4	T3	0.2	11/0.4	4	Delta/Wye
5	T4	0.2	11/0.4	4	Delta/Wye

Tabel 3.3 Data Transformator Distribusi pada Proyek Pakistan Deep Water Container Port (Lanjutan)

No	ID	MVA	Rating (kV)	%Z	Konfigurasi
6	T5	0.25	11/0.4	4	Delta/Wye
7	T6	0.25	11/0.4	4	Delta/Wye
8	T7	1.25	11/0.4	5	Delta/Wye
9	T8	1.25	11/0.4	5	Delta/Wye
10	T9	1.25	11/0.4	5	Delta/Wye
11	T10	1.25	11/0.4	5	Delta/Wye
12	T11	0.315	11/0.4	6	Delta/Wye
13	T12	1.25	11/0.4	5	Delta/Wye
14	T13	1.25	11/0.4	5	Delta/Wye
15	T14	1.25	11/0.4	5	Delta/Wye
16	T15	1.25	11/0.4	5	Delta/Wye
17	T17	2.5	11/0.4	6	Delta/Wye

Tabel 3.4 Data Beban Motor 11 kV pada Proyek Pakistan Deep Water Container Port

No	ID	kW	kVA	kV	%PF
1	Mtr1	700	810	11	92.34
2	Mtr2	700	810	11	92.34
3	Mtr3	2000	2200	11	92.81
4	Mtr4	2000	2200	11	92.81
5	Mtr5	2000	2295	11	92.78
6	Mtr6	2000	2295	11	92.78
7	Mtr7	2000	2295	11	92.78
8	Mtr8	2000	2295	11	92.78
9	Mtr9	2000	2199	11	92.38
10	Mtr10	2000	2453	11	85.24

Tabel 3.4 Data Beban Motor Proyek pada Pakistan Deep Water Container Port (Lanjutan)

No	ID	kW	kVA	kV	%PF
11	Mtr11	2000	2200	11	92.81
12	Mtr12	2000	2200	11	92.81
13	Mtr17	2000	2295	11	92.78
14	Mtr18	2000	2295	11	92.78
15	Mtr19	2000	2295	11	92.78
16	Mtr20	2000	2295	11	92.78

3.4 Sumber Harmonisa pada Proyek Pakistan Deep Water Container Port

Terjadinya harmonisa disebabkan oleh adanya pengoperasian beban-beban non linier pada *plant* tersebut. Distorsi harmonisa yang terjadi pada Proyek Pakistan Deep Water Container port merupakan kontribusi dari *Variable Frequency Drive* (VFD) dan transformator. Hal tersebut menyebabkan *Total Harmonic Distortion* (THD) maupun *Individual Harmonic Distortion* (IHD) arus dan tegangan melebihi standar IEEE 519-1992.

Pada Proyek Pakistan Deep Water Container port, VFD digunakan sebagai pengatur kecepatan motor induksi yang digunakan untuk bongkar – muat *container* di pelabuhan. Pada prinsipnya, VFD menggunakan komponen elektronika daya yang dapat memberi variasi frekuensi masukan ke motor induksi. Penggunaan VFD bertujuan untuk mengatasi terjadinya arus *starting* motor yang sangat tinggi.

Tabel 3.5 Data VFD pada Motor Sebagai Penghasil Harmonik

No	ID	Manufacturer	Model	Type
1	VFD 1	ABB	ACS600 6P	Current Source
2	VFD 2	ABB	ACS600 6P	Current Source
3	VFD 3	ABB	ACS600 6P	Current Source
4	VFD 4	ABB	ACS600 6P	Current Source
5	VFD 5	ABB	ACS600 6P	Current Source
6	VFD 6	ABB	ACS600 6P	Current Source

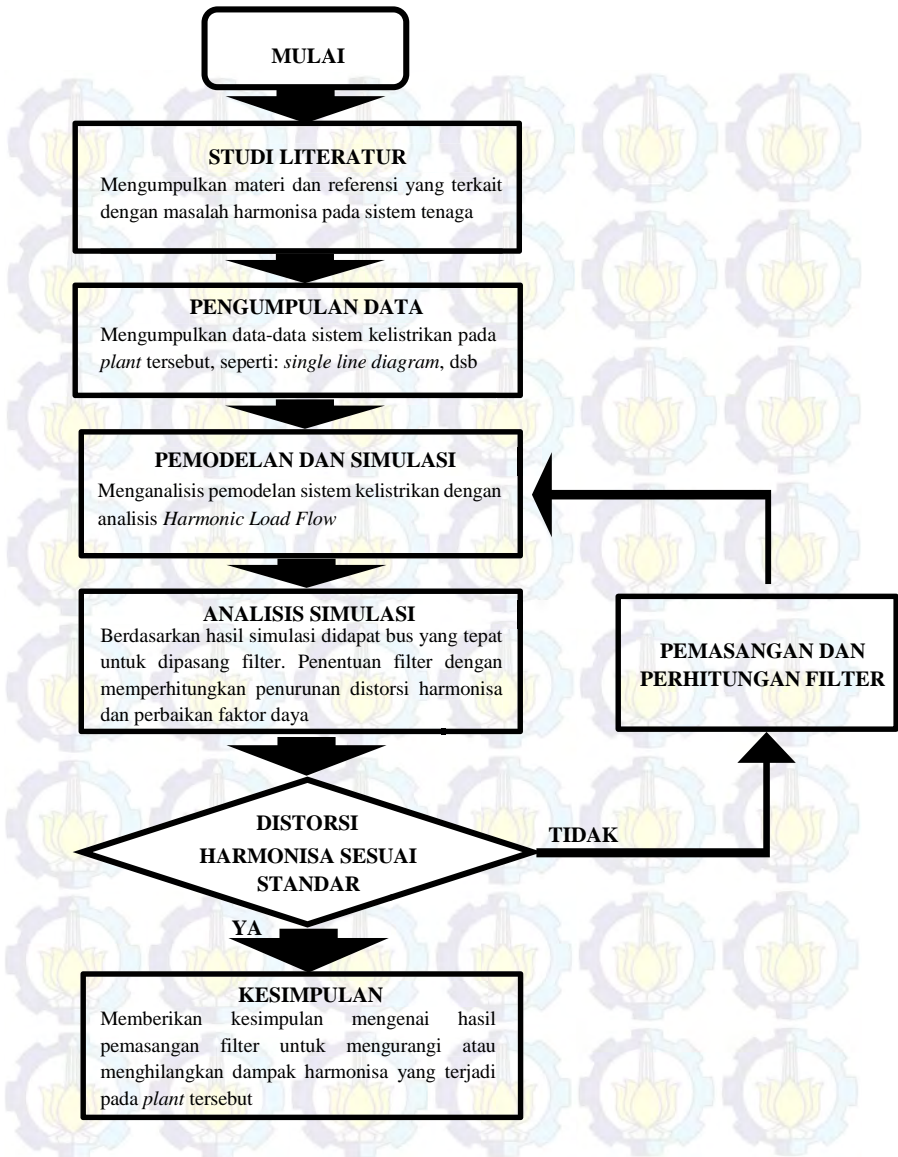
Tabel 3.5 Data VFD pada Motor Sebagai Penghasil Harmonik (Lanjutan)

No	ID	Manufacturer	Model	Type
7	VFD 7	ABB	ACS600 6P	Current Source
8	VFD 8	ABB	ACS600 6P	Current Source
9	VFD 9	ABB	ACS600 6P	Current Source
10	VFD 10	ABB	ACS600 6P	Current Source
11	VFD 11	ABB	ACS600 6P	Current Source
12	VFD 12	ABB	ACS600 6P	Current Source
13	VFD 13	ABB	ACS600 6P	Current Source
14	VFD 14	ABB	ACS600 6P	Current Source
15	VFD 15	ABB	ACS600 6P	Current Source
16	VFD 16	ABB	ACS600 6P	Current Source

3.5 Langkah-langkah Peredaman Harmonisa pada Proyek Pakistan Deep Water Container Port

Tujuan dari pengerjaan Tugas Akhir ini adalah untuk meredam bahkan menghilangkan frekuensi harmonisa yang timbul akibat adanya beban motor berkapasitas besar yang dikontrol dengan VFD. Oleh karena itu, dilakukan simulasi sistem kelistrikan pada *plant* tersebut. Hasil yang didapat dari simulasi tersebut menjadi acuan dalam penentuan spesifikasi filter yang akan dipasang pada *plant* tersebut.

Untuk mengawali pengerjaan Tugas Akhir ini, dilakukan pelengkapan data dari *Single Line Diagram* (SLD), *datasheet* dari peralatan, serta referensi-referensi yang diperlukan. Setelah itu, pemodelan dilakukan dengan menggunakan *software* ETAP 11.0.0. Dengan menggunakan *software* tersebut dapat dianalisa bagaimana aliran daya dan harmonisa yang terjadi. Analisis harmonisa berfokus pada bus-bus yang paling berdekatan dengan beban motor yang dikontrol oleh VFD, karena pada umumnya darisanalah sumber frekuensi harmonisa timbul. Dengan analisis tersebut didapatkan orde harmonisa yang dominan terjadi pada bus-bus yang dianalisis, kemudian hasil analisis tersebut digunakan untuk mendesain filter pasif sebagai peredaman harmonisa yang terjadi sekaligus untuk mengkompensasi daya reaktif sebagai perbaikan faktor daya. Barulah jika filter pasif belum dapat meredam seluruh sumber harmonisa yang timbul, perlu dilakukan penambahan filter aktif kedalam sistem. Metodologi dalam tugas akhir ini digambarkan dalam *flowchart* pada Gambar 3.2. sebagai berikut :



Gambar 3.2 Flowchart Pengerjaan Tugas Akhir

BAB IV

SIMULASI DAN ANALISIS

Pada tugas akhir ini difokuskan pada peredaman harmonisa yang terjadi dan perbaikan faktor daya pada Proyek Pakistan Deep Water Containeer Port. Simulasi pada sistem kelistrikan pada plant tersebut dilakukan untuk mengetahui kinerja sistem serta gangguan yang terjadi. Proses simulasi menggunakan *software* ETAP 11.0 dan Powersim. Setelah simulasi dijalankan maka akan didapat hasil berupa data. Data tersebut yang nantinya akan dianalisis sesuai dengan permasalahan yang terjadi. Dengan analisis tersebut diharapkan mampu menghasilkan solusi terkait permasalahan yang terjadi pada *plant* tersebut. Untuk mempermudah proses simulasi dan analisis dibuat beberapa tahapan guna mendapatkan hasil yang maksimal. Berikut adalah beberapa tahap yang perlu dilakukan dalam proses analisis.

- 1. Melakukan simulasi aliran daya pada plant tersebut.** Hal ini bertujuan untuk mengetahui nilai faktor daya. Simulasi ini nantinya akan digunakan untuk perhitungan nilai filter sehingga mampu memperbaiki kualitas faktor daya pada sistem tersebut.
- 2. Menjalankan simulasi harmonisa pada sistem kelistrikan Proyek Pakistan Deep Water Containeer Port.** Proses simulasi dilakukan terutama pada bus-bus yang terdapat sumber utama harmonisa berupa VFD. Bus-bus tersebut diantaranya : HSB-SS6-01A, HSB-SS6-01B, HSB-SS7-01A, dan HSB-SS7-01B.
- 3. Perhitungan dan pemasangan filter pada sistem.** Pemasangan filter dilakukan pada bus-bus yang merupakan sumber utama harmonisa terjadi. Karena dengan pemasangan filter pada bus-bus tersebut (HSB-SS6-01A, HSB-SS6-01B, HSB-SS7-01A, dan HSB-SS7-01B) penurunan distorsi harmonisa akan lebih maksimal. Perhitungan filter selain dapat menurunkan nilai distorsi harmonisa juga dapat memperbaiki faktor daya pada plant tersebut.
- 4. Melakukan analisis perbandingan harmonisa dan faktor daya.** Analisis dilakukan pada kondisi sebelum dan sesudah pemasangan filter. Analisis perbandingan juga dilakukan ketika pemasangan filter pasif dan filter *hybrid*.

4.1 Simulasi Aliran Daya pada Sistem Kelistrikan Proyek Pakistan Deep Water Container Port

Pada tugas akhir ini, simulasi aliran daya bertujuan untuk melihat daya yang tersalur mulai dari pusat pembangkit hingga ke beban dan nilai *Power Factor* yang terdapat pada plant tersebut. Berikut adalah data hasil simulasi aliran daya pada Proyek Pakistan Deep Water Containeer Port.

Tabel 4.1 Data Hasil Simulasi Aliran Daya pada Bus Generator

ID BUS	kV	kW	kVAR	kVA	%pf
Bus 2	11	5878	5380	7968	73.8
Bus 3	11	7500	3000	8078	92.8
Bus 4	11	7500	2000	7762	96.6
Bus 5	11	1000	500	1118	89.4
Bus 31	11	1000	500	1118	89.4

Tabel 4.2 Data Hasil Simulasi Aliran Daya pada Bus Penyulang Utama (*Main Bus*)

ID BUS	kV	kW	kVAR	kVA	%pf
MV-CP-004A	11	21483	10296	23823	90.2
Bus 13	11	1392	1081	1762	79.0
Bus 14	0.4	1368	907	1641	83.3

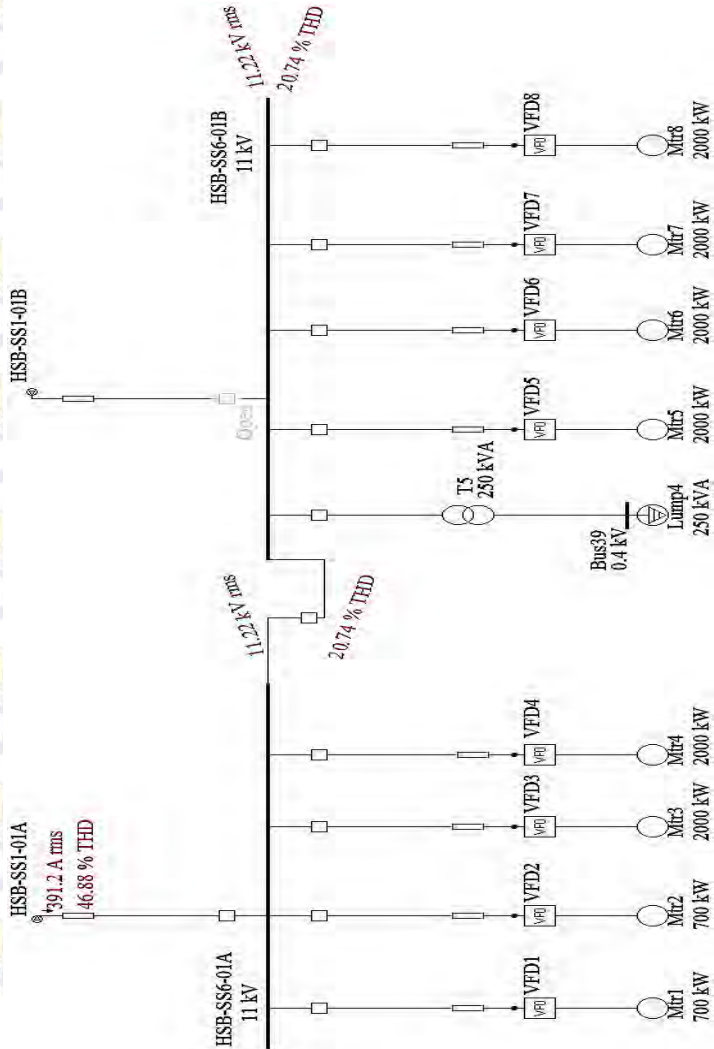
Tabel 4.3 Data Hasil Simulasi Aliran Daya pada *Network* SS-6 dan SS-7 (Bus Harmonisa)

ID BUS	kV	kW	kVAR	kVA	%pf
HSB-SS6-01A	11	6254	2534	6747	93.7
HSB-SS7-01A	11	7597	3215	8249	92.1

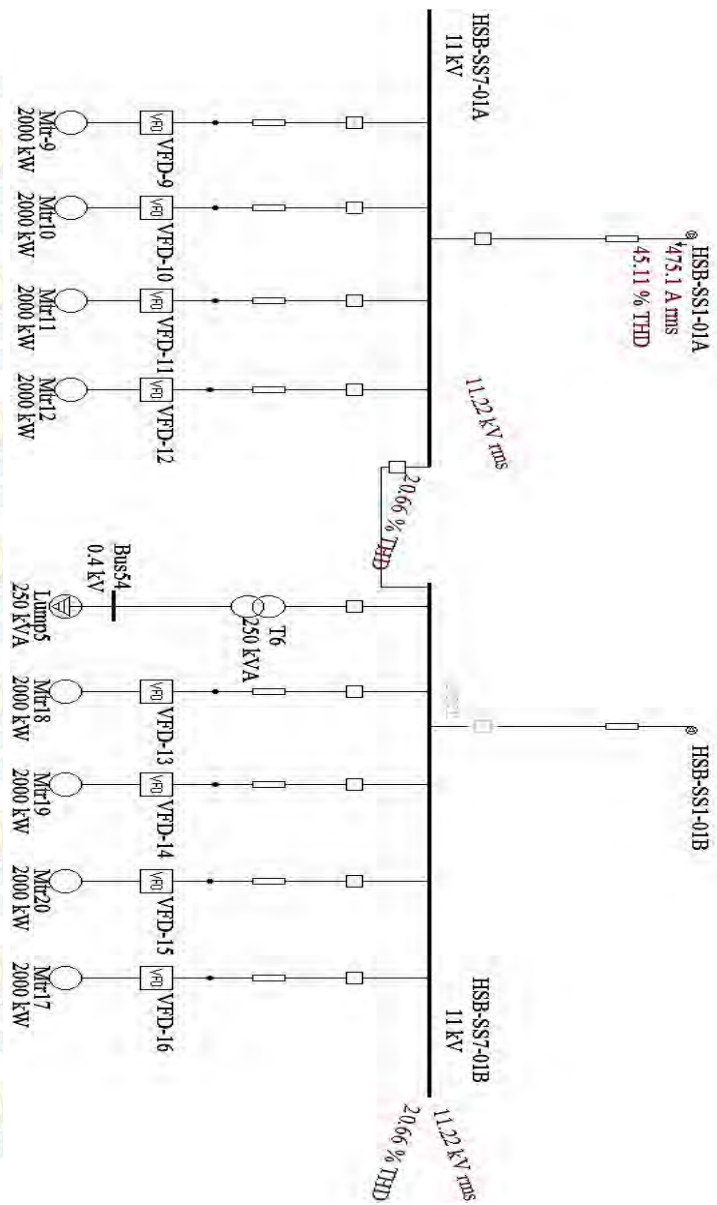
Berdasarkan data hasil simulasi aliran daya diatas, didapat nilai *Power Factor* yang beragam. *Power Factor* tertinggi mencapai nilai 93.7 yaitu pada bus HSB-SS6-01A sedangkan *Power Factor* terendah pada bus 2 yaitu bernilai 73.8. Pemasangan filter pada plant ini, selain mampu menurunkan nilai distorsi harmonik yang timbul, juga mampu untuk meningkatkan nilai *Power Factor*. Sehingga diharapkan dengan pemasangan filter nantinya, permasalahan harmonisa dan *Power Factor* dapat teratasi.

4.2 Simulasi Harmonisa pada Sistem Kelistrikan Proyek Pakistan Deep Water Container Port

Berikut adalah gambar hasil simulasi harmonisa pada *Network SS-6* dan *Network SS-7* pada kondisi awal (sebelum pemasangan filter).



Gambar 4.1 Simulasi Harmonisa pada *Network SS-6*



Gambar 4.2 Simulasi Harmonisa pada Network SS-7

Simulasi harmonisa difokuskan pada bus-bus yang merupakan sumber utama harmonisa, seperti pada gambar 4.1 dan 4.2 diatas. Yaitu pada bus-bus yang memiliki motor berkapasitas besar serta dikontrol menggunakan VFD. Bus-bus tersebut terdapat pada *composite network* SS-6 dan SS-7, diantaranya : HSB-SS6-01A, HSB-SS6-01B, HSB-SS7-01A, dan HSB-SS7-01B. Untuk mendapatkan hasil penurunan distorsi harmonisa yang maksimal, maka simulasi akan dilakukan dengan beberapa tahapan. Simulasi yang akan dilakukan nantinya adalah sebagai berikut :

1. Simulasi sistem kelistrikan sebelum ditambahkan filter
2. Simulasi sistem kelistrikan setelah pemasangan filter pasif
3. Simulasi sistem kelistrikan setelah pemasangan filter hybrid

Berikut adalah hasil simulasi harmonisa pada sistem kelistrikan sebelum ditambahkan filter.

Tabel 4.4 Data Hasil Simulasi Harmonisa Tanpa Filter

From Bus ID	To Bus ID	Nominal kV	THDi %	THDv %
Bus1	HSB-SS2-01B	11	11.61	20.29
Bus2	Bus9	11	19.80	20.53
Bus3	Bus10	11	19.53	20.53
Bus4	Bus11	11	20.33	20.53
Bus5	Bus12	11	29.29	20.54
Bus6	HSB-SS2-01B	11	36.40	20.29
Bus9	MV-CP-004A	11	19.80	20.54
Bus10	MV-CP-004A	11	19.53	20.54
Bus11	MV-CP-004A	11	20.33	20.54
Bus12	MV-CP-004A	11	29.29	20.54
Bus13	Bus14	11	7.95	20.54
Bus14	Bus92	0.4	8.37	14.19
Bus15	MCC-CP-006 BUS C	0.4	0.00	14.07
Bus16	MV-CP-004B	11	0.00	14.07
Bus19	Bus72	11	36.40	20.29
Bus21	Bus74	11	36.40	20.29
Bus22	HSB-SS1-01A	0.4	13.04	16.08

Tabel 4.4 Data Hasil Simulasi Harmonisa Tanpa Filter (Lanjutan)

From Bus ID	To Bus ID	Nominal kV	THDi %	THDv %
Bus23	HSB-SS1-01B	0.4	13.04	16.08
Bus25	Bus71	11	33.16	20.29
Bus26	Bus75	11	27.36	20.28
Bus28	MV-CP-004A	11	29.29	20.54
Bus31	Bus28	11	29.29	20.54
Bus33	HSB-SS6-01A	11	47.75	20.87
Bus34	HSB-SS6-01A	11	47.75	20.87
Bus35	HSB-SS6-01B	11	47.75	20.87
Bus36	HSB-SS6-01B	11	47.75	20.87
Bus37	HSB-SS6-01B	11	47.75	20.87
Bus38	HSB-SS6-01B	11	47.75	20.87
Bus39	HSB-SS6-01B	0.4	13.15	16.23
Bus40	HSB-SS2-01A	11	27.36	20.28
Bus41	Bus97	11	27.36	20.28
Bus43	HSB-SS5-01	0.4	13.99	18.20
Bus44	HSB-SS7-01A	11	47.68	20.99
Bus47	HSB-SS7-01A	11	47.76	20.68
Bus49	HSB-SS7-01A	11	47.77	20.79
Bus54	HSB-SS7-01B	0.4	13.10	16.16
Bus55	HSB-SS2-01A	11	27.36	20.28
Bus56	HSB-SS7-01A	11	47.77	20.79
Bus61	HSB-SS7-01B	11	47.77	20.78
Bus62	HSB-SS7-01B	11	47.77	20.78
Bus63	HSB-SS7-01B	11	47.77	20.78
Bus64	HSB-SS7-01B	11	47.77	20.78
Bus67	Bus1	0.4	11.91	14.52
Bus68	Bus55	0.4	27.36	13.30
Bus69	Bus40	0.4	27.36	13.30
Bus71	Bus25	0.4	33.16	15.84
Bus72	Bus19	0.4	36.40	17.27
Bus73	Bus6	0.4	36.40	17.27
Bus74	Bus21	0.4	36.40	17.27
Bus75	Bus26	0.4	27.36	13.30

Tabel 4.4 Data Hasil Simulasi Harmonisa Tanpa Filter (Lanjutan)

From Bus ID	To Bus ID	Nominal kV	THDi %	THDv %
Bus79	HSB-SS5-01	11	35.68	20.85
Bus80	HSB-SS5-01	0.4	14.21	18.02
Bus81	HSB-SS4-01	11	14.18	21.00
Bus83	HSB-SS27-01	11	31.86	20.90
Bus87	MCC-CP-006B	0.4	0.00	14.07
Bus90	HSB-SS6-01A	11	47.75	20.87
Bus91	HSB-SS6-01A	11	47.75	20.87
Bus92	MCC-CP-006A	0.4	8.37	14.07
Bus97	Bus41	0.4	27.36	13.30
HSB-SS1-01A	MV-CP-004A	11	23.05	20.56
HSB-SS1-01B	HSB-SS2-02B	11	300.07	20.56
HSB-SS1-02	HSB-SS2-01B	11	27.02	20.56
HSB-SS2-01A	HSB-SS1-01A	11	27.83	20.29
HSB-SS2-01B	HSB-SS1-02	11	27.83	20.29
HSB-SS2-02A	HSB-SS1-01A	11	0	20.59
HSB-SS2-02B	HSB-SS1-01B	11	0	20.59
HSB-SS3-01	HSB-SS1-02	11	48.35	20.76
HSB-SS4-01	Bus81	11	23.38	20.95
HSB-SS5-01	HSB-SS1-01A	11	13.82	20.68
HSB-SS6-01A	HSB-SS1-01A	11	46.84	20.74
HSB-SS6-01B	HSB-SS6-01A	11	44.94	20.74
HSB-SS7-01A	HSB-SS1-01A	11	45.04	20.66
HSB-SS7-01B	HSB-SS7-01A	11	44.96	20.66
HSB-SS27-01	Bus83	11	18.12	20.98
MCC-1P-007	MCC-CP-006A	0.4	7.70	13.91
MCC-2CP-007 (ENGINE-2).	MCC-CP-006A	0.4	7.86	13.91
MCC-3CP-007 (ENGINE-3).	MCC-CP-006A	0.4	7.86	13.91
MCC-CP-006A	MCC-1P-007	0.4	7.70	14.07
MCC-CP-006B	MCC-CP-006A	0.4	26.45	14.07
MCC-CP-006C	MCC-CP-006B	0.4	9.93	14.07

Tabel 4.4 Data Hasil Simulasi Harmonisa Tanpa Filter (Lanjutan)

From Bus ID	To Bus ID	Nominal kV	THDi %	THDv %
MCC-CP-008	MCC-CP-006A	0.4	7.85	14.07
MV-CP-004A	HSB-SS1-01A	11	23.05	20.54
MV-CP-004B	Bus16	11	0	14.07
Cable61~	MCC-CP-006 BUS C	0.4	0	14.07
Cable62~	MCC-CP-006 BUS C	0.4	0	14.07
Cable63~	MCC-CP-006 BUS C	0.4	0	14.07
Cable12~	HSB-SS1-01B	11	0	20.56
Cable23~	HSB-SS1-01B	11	0	20.56

Berdasarkan hasil simulasi harmonisa tanpa filter, didapatkan hampir seluruh bus yang ada pada plant tersebut memiliki tingkat harmonisa yang melebihi batas dari standar yang telah ditetapkan oleh IEEE.

4.2.1 Distorsi Harmonisa Terhadap Tegangan

Nilai batas yang telah ditetapkan oleh standar IEEE 519-1992 mengenai harmonisa adalah maksimal sebesar 5% untuk nilai *Total Harmonic Distortion* (THDv) dan maksimal 3% untuk nilai *Individual Harmonic Distortion* (IHDv) pada level tegangan dibawah 69 kV. Untuk lebih jelasnya, regulasi tersebut dapat dilihat pada tabel 4.2 berikut :

Tabel 4.5 Batas Nilai Harmonisa Tegangan Sesuai IEEE STD 519-1992

Tegangan Bus Pada PCC	Distorsi Tegangan Individual (%)	THD (%)
69 kV dan ke bawah	3	5
69,001 kV sampai 161 kV	1,5	2,5
161,001 kV dan ke atas	1	1,5

Pembahasan selanjutnya mengenai harmonisa tegangan akan terkonsentrasi pada bus-bus yang ada pada *network* SS-6 dan SS-7.

4.2.1.1 Harmonisa Tegangan pada Network SS-6

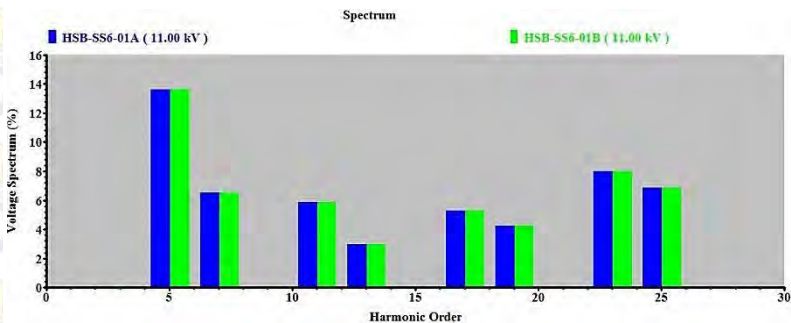
Pada *network* SS-6 ini, dibahas mengenai pengaruh distorsi harmonisa tegangan yang disebabkan oleh penggunaan beban motor yang dilengkapi VFD pada bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS6-01B. Berikut adalah data yang didapat dari hasil simulasi harmonisa tegangan pada kedua bus tersebut.

Tabel 4.6 Persentase Harmonisa Terhadap Tegangan Fundamental di Orde Tertentu pada bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS6-01B

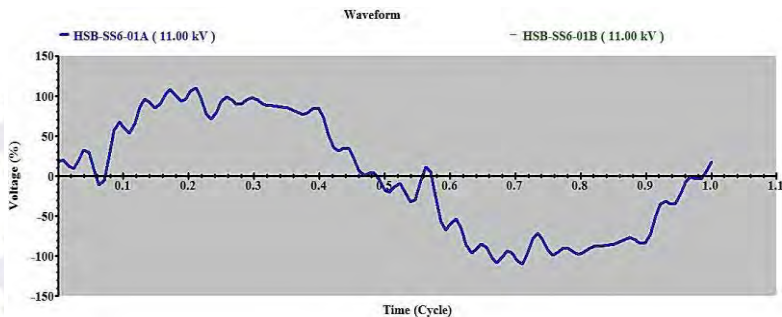
BUS ID	kV	THD _v (%)	ORDE (%)							
			5	7	11	13	17	19	23	25
HSB-SS6-01A	11.22	20.74	13.6	6.52	5.91	2.96	5.31	4.26	8.02	6.88
HSB-SS6-01B	11.22	20.74	13.6	6.52	5.91	2.96	5.31	4.26	8.02	6.88

Berdasarkan tabel 4.3 di atas, terjadi kenaikan pada tegangan nominal. Pada awalnya tegangan bus terukur 11 kV dan akibat harmonisa tegangan bus naik menjadi 11,22 kV. Nilai THD_v juga jauh melebihi standar yang ditetapkan IEEE. Standar yang sesuai untuk tegangan 11 kV untuk THD_v adalah sebesar 5% sedangkan pada plant sebesar 20.74%. Nilai individual harmonik pada orde tertentu juga semua dalam kondisi melebihi batas yang ditetapkan yaitu sebesar 3%.

Berikut adalah gambar diagram dan gelombang distorsi harmonisa yang terjadi pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS6-01B akibat adanya pembebanan berupa motor dengan VFD pada Proyek Pakistan Deep Water Container Port.



Gambar 4.3 Diagram Harmonisa Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS6-01B



Gambar 4.4 Gelombang Harmonisa Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS6-01B

Gambar diagram 4.3 menunjukkan orde dan besar distorsi harmonisa yang timbul pada bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS6-01B. Berdasarkan hasil simulasi, orde harmonisa tertinggi yang muncul adalah orde kelima dan kedua puluh tiga. Sedangkan pada gambar 4.4 merupakan gelombang dari sistem yang telah terdistorsi oleh harmonisa. Bentuk awal gelombang yang berupa sinusoidal murni menjadi tidak berbentuk sinusoidal lagi. Bentuk gelombang atau sinyal yang telah terdistorsi harmonisa tersebut sangat berbahaya bagi peralatan tenaga listrik yang sensitif. Karena dapat mengakibatkan kerusakan serta terjadi salah pembacaan (*missreading*) pada peralatan.

4.2.1.2 Harmonisa Tegangan pada Network SS-7

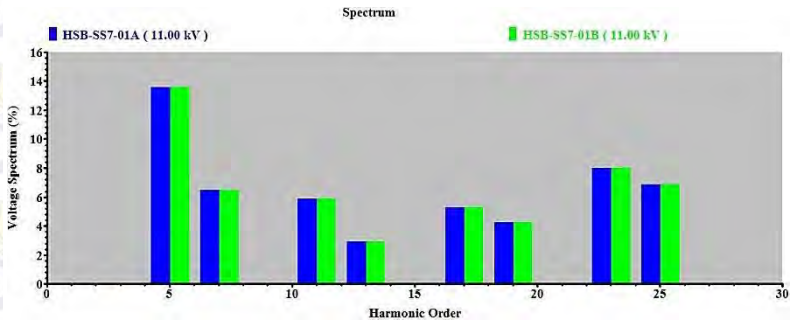
Pada network SS7, simulasi harmonisa dilakukan pada bus HSB-SS7-01A dan HSB-SS7-01B. Berikut adalah data yang didapat dari hasil simulasi harmonisa tegangan pada kedua bus tersebut.

Tabel 4.7 Persentase Harmonisa Terhadap Tegangan Fundamental di Orde Tertentu pada bus HSB-SS7-01A dan HSB-SS7-01B

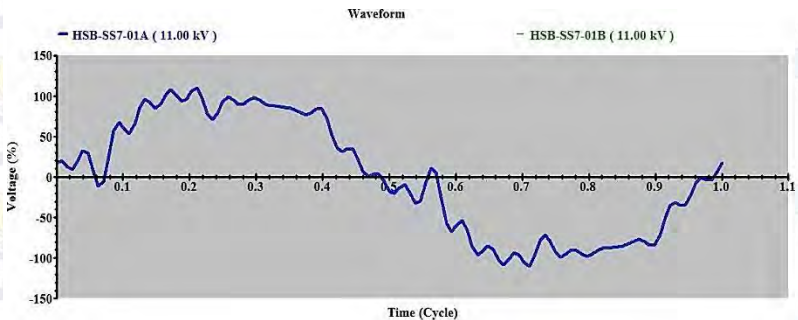
BUS ID	kV	THD _v (%)	ORDE (%)							
			5	7	11	13	17	19	23	25
HSB-SS7-01A	11.22	20.66	13.55	6.50	5.88	2.95	5.29	4.24	7.99	6.87
HSB-SS7-01B	11.22	20.66	13.55	6.50	5.88	2.95	5.29	4.24	7.99	6.87

Dari tabel 4.4 diatas dapat dilihat bahwa orde tertinggi yang muncul adalah orde kelima diikuti oleh orde kedua puluh tiga. Orde

frekuensi yang dominan muncul identik dengan bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS6-01B dikarenakan kedua bus ini memiliki jenis VFD serta pembebanan yang hampir sama dengan yang terdapat pada bus HSB-SS7-01A dan HSB-SS7-01B ini. Berikut adalah gambar diagram dan gelombang distorsi harmonisa yang terjadi pada bus HSB-SS7-01A dan HSB-SS7-01B.



Gambar 4.5 Diagram Harmonisa Tegangan pada Bus HSB-SS7-01A dan HSB-SS7-01B



Gambar 4.6 Gelombang Harmonisa Tegangan pada Bus HSB-SS7-01A dan HSB-SS7-01B

Bentuk diagram serta gelombang pada bus HSB-SS7-01A dan HSB-SS7-01B memiliki bentuk yang hampir sama (identik) dengan bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS6-01B sehingga dapat disimpulkan bahwa bentuk diagram serta gelombang kedua bus tersebut identik dikarenakan adanya kapasitas pembebanan yang hampir sama dan penggunaan VFD yang sejenis.

4.2.2 Distorsi Harmonisa Terhadap Arus

Pada *plant* Pakistan Deep Water Containeer Port, simulasi harmonisa terhadap arus juga difokuskan pada bus-bus yang terdapat di dalam *composite network* SS-6 dan SS-7. Untuk menganalisa nilai harmonisa arus agar sesuai dengan standar IEEE, perlu dilakukan perhitungan I_{SC}/I_L . I_{SC} merupakan arus hubung singkat maksimum sedangkan I_L adalah arus pembebanan maksimum. Untuk mengetahui nilai I_{SC} dan I_L didapat melalui simulasi aliran daya (*Load Flow*) pada bus yang tempat sumber utama harmonisa pada *plant* tersebut. Untuk memperjelas regulasi mengenai standar harmonisa arus pada IEEE, dapat dilihat sesuai tabel di bawah ini.

Tabel 4.8 Batas Nilai Harmonisa Arus Sesuai IEEE STD 519-1992

Distorsi Harmonisa Arus Maksimum dalam Persen terhadap I_L						
I_{SC}/I_L	Orde Harmonisa Individual (Harmonisa Orde Ganjil)					
	<11	$11 \leq h \leq 17$	$17 \leq h \leq 23$	$23 \leq h \leq 35$	$35 \leq h$	TDD
<20*	4	2	1,5	0,6	0,3	5
20-50	7	3,5	2,5	1	0,5	8
50-100	10	4,5	4	1,5	0,7	12
100-1000	12	5,5	5	2	1	15
>1000	15	7	6	2,5	1,4	20
Harmonisa orde genap dibatasi 25% dari Harmonisa orde ganjil di atas.						
Tidak diperbolehkan distorsi arus yang dihasilkan sistem DC, contohnya converter setengah gelombang.						
*Semua peralatan pembangkit listrik terbatas pada nilai-nilai distorsi arus terlepas dari I_{SC}/I_L aktual.						
dimana :						
I_{SC} = Arus hubung singkat maksimum pada PCC						
I_L = Arus beban maksimum (komponen frekuensi fundamental) pada PCC						

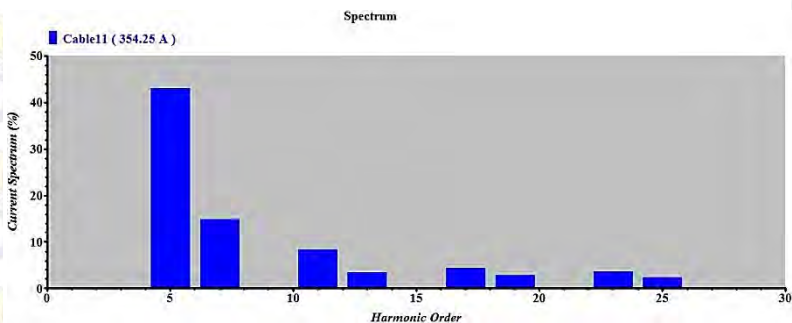
4.2.2.1 Harmonisa Arus pada Network SS-6

Untuk melihat besarnya nilai harmonisa arus yang terjadi pada pada *network* ini, dilakukan simulasi harmonisa. Pada simulasi tersebut yang dipilih atau diplot adalah kabel 11 yang merupakan sumber input dari bus HSB-SS6-01A. Berikut adalah data hasil simulasi tersebut.

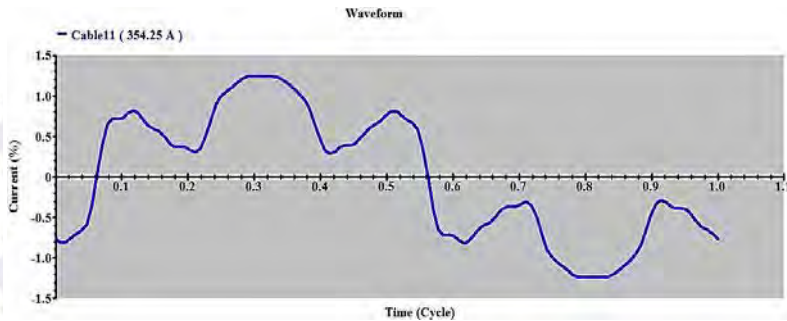
Tabel 4.9 Persentase Harmonisa Terhadap Arus Fundamental Orde Tertentu pada *cable* 11

ID	Arus (A)	THDi (%)	ORDE (%)							
			5	7	11	13	17	19	23	25
cable 11	354.2	46.88	42.99	14.8	8.45	3.51	4.4	2.91	3.57	2.41

Berdasarkan hasil simulasi *Load Flow* pada *network* SS-6 didapatkan nilai I_{sc} sebesar 22.45 kA. Untuk nilai I_L didapat 354.12 A. Untuk mengetahui standar harmonisa untuk arus perlu perhitungan I_{sc}/I_L , hasil perhitungan tersebut mendapatkan nilai sebesar 63.4 A. Selanjutnya, hasil perhitungan tersebut I_{sc}/I_L dibuat sebagai referensi untuk penentuan standar harmonisa sesuai tabel 4.5. Berdasarkan tabel 4.5 didapatkan batas maksimal untuk *Total Harmonic Distortion* (THDi) sebesar 12%. Hasil simulasi harmonisa arus menunjukkan bahwa nilai THDi melewati batas yang telah ditentukan. Untuk nilai individual harmonik per-orde juga banyak yang melewati batas. Sesuai dengan tabel 4.6 didapatkan nilai orde harmonisa tertinggi adalah pada orde kelima dan orde ketujuh. Berikut adalah bentuk diagram dan gelombang dari hasil simulasi yang dilakukan pada *cable* 11.



Gambar 4.7 Diagram Harmonisa Arus pada Bus *Cable* 11



Gambar 4.8 Gelombang Harmonisa Arus pada Bus *Cable 11*

Bentuk gelombang distorsi arus harmonisa yang terjadi pada *Cable 11* memiliki karakteristik bentuk yang hampir sama dengan bentuk gelombang dari VFD yang terpasang pada bus tersebut. Bentuk gelombang juga memiliki *ripple* yang cukup besar dan sudah tidak berbentuk sinusoidal lagi. Hal tersebut tentu sangat berbahaya bagi peralatan yang beroperasi pada sistem tersebut.

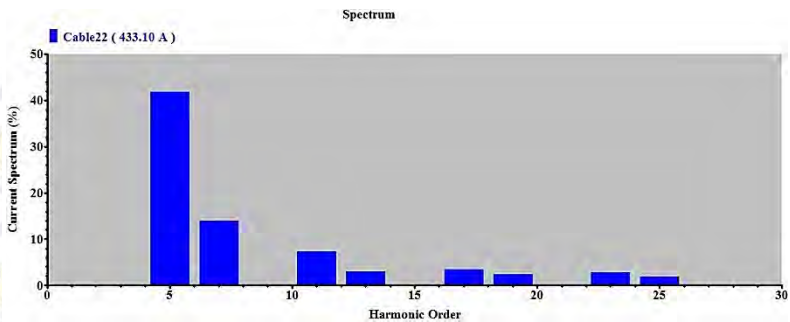
4.2.2.2 Harmonisa Arus pada Network SS-7

Pada *network SS-7*, harmonisa arus didapatkan melalui simulasi dengan memplot *cable 22* yang merupakan sumber input dari bus HSB-SS7-01A. Berikut adalah data hasil simulasi tersebut.

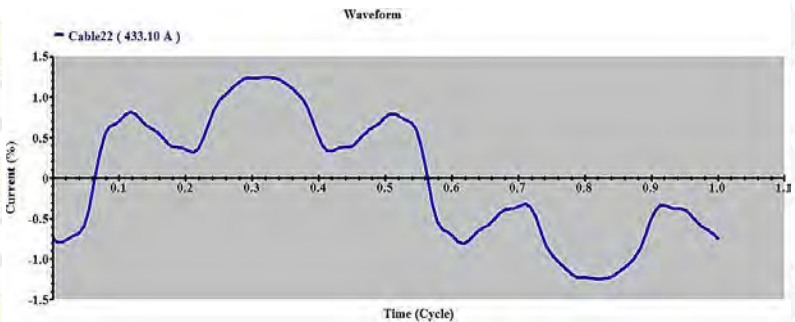
Tabel 4.10 Persentase Harmonisa Terhadap Arus Fundamental Orde Tertentu pada *cable 22*

ID	Arus (A)	THDi (%)	ORDE (%)							
			5	7	11	13	17	19	23	25
cable 22	354.2	46.88	42.99	14.8	8.45	3.51	4.4	2.91	3.57	2.41

Seperti pada *network SS-6*, untuk mengetahui batas nilai harmonisa arus yang diizinkan perlu dilakukan simulasi *Load Flow* untuk mendapatkan nilai I_{sc} dan I_L . Berdasarkan hasil simulasi didapatkan nilai I_{sc} sebesar 16.6 kA dan nilai I_L sebesar 432 A. Sehingga sesuai perhitungan didapatkan nilai I_{sc}/I_L sebesar 38.43 A. Berdasarkan tabel 4.5 didapatkan nilai batas THDi sebesar 8%. Menurut tabel 4.7 dapat disimpulkan bahwa nilai THDi dan individual harmonik per-orde pada *cable 22* telah melewati batas yang ditentukan.



Gambar 4.9 Diagram Harmonisa Arus pada Bus *Cable 22*



Gambar 4.10 Gelombang Harmonisa Arus pada Bus *Cable 22*

Bentuk diagram serta gelombang hasil simulasi harmonisa pada *Cable 22* memiliki bentuk yang hampir sama (identik) dengan *Cable 11*, dikarenakan adanya kapasitas pembebanan yang hampir sama dan penggunaan VFD yang sejenis.

4.3 Pemasangan dan Perhitungan Spesifikasi Filter Pasif

Pada tugas akhir ini, untuk mengatasi harmonisa yang terjadi pada Proyek Pakistan Deep Water Container Port dilakukan pemasangan filter pasif. Filter tersebut dipasang pada bus-bus yang terdapat motor berkapasitas besar yang kecepatannya diatur menggunakan VFD. Bus tersebut diantaranya : HSB-SS6-01A, HSB-SS6-01B, HSB-SS7-01A, dan HSB-SS7-01B. Penentuan filter disesuaikan dengan orde harmonisa yang timbul pada bus tersebut. Perhitungan filter selain bertujuan untuk penurunan distorsi harmonisa juga sebagai perbaikan faktor daya yang ada pada *plant* tersebut.

4.3.1 Perhitungan dan Pemasangan Filter Pasif Orde 5 pada Network SS-6

Proses filterisasi dimulai pada bus yang memiliki tingkat harmonisa terbesar. Berdasarkan simulasi harmonisa, orde 5 merupakan orde yang memiliki tingkat distorsi harmonisa terbesar. Berikut adalah perhitungan spesifikasi dari filter orde 5 :

$$\text{kVAR} = 1787 \quad (4.1)$$

$$C = \frac{\text{kVAR}}{\omega_0 \times V_{LL}^2} \quad (4.2)$$

$$C = \frac{1787}{(2\pi \times 50) \times (11)^2} = 47.01 \mu\text{F} \quad (4.3)$$

$$L = \frac{1}{(2\pi \times 50 \times 5)^2 \times 47.01 \times 10^{-6}} = 8.6299 \times 10^{-3} \text{H} \quad (4.4)$$

$$X_L = 2\pi \times 50 \times 8.6299 \times 10^{-3} = 2.7098 \Omega \quad (4.5)$$

$$Q_{\text{faktor}} = 30 \quad (4.6)$$

$$R = \frac{2.7098}{30} = 0.0903 \Omega \quad (4.7)$$

Nilai kVAR yang dimasukkan ke dalam perhitungan adalah sesuai dengan faktor daya yang akan dicapai. Target faktor daya pada sistem ini adalah 1. Q_{faktor} bernilai antara 30 sampai 60. Fungsi dari Q_{faktor} atau biasa disebut faktor kualitas adalah untuk menentukan ketajaman dalam proses *filtering*. Besar kecilnya nilai Q_{faktor} mempengaruhi *bandwith* dari sinyal yang akan di filter. Hasil yang didapat pada proses *filtering* orde 5 ini, yaitu terjadi penurunan distorsi harmonisa yang cukup signifikan pada orde tersebut. Sedangkan untuk distorsi harmonisa yang terjadi pada orde lainnya masih cukuplah tinggi. Sehingga perlu dipasang filter kembali yang sesuai dengan orde harmonisa yang timbul. Berikut ditampilkan data persentase harmonisa pada bus dan kabel setelah pemasangan filter orde 5 pada *network* SS-6.

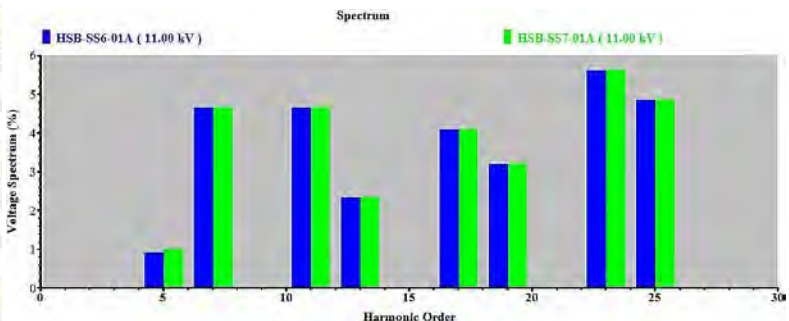
Tabel 4.11 Persentase Harmonisa Terhadap Tegangan Fundamental pada Orde Tertentu Setelah Pemasangan Filter Orde 5

BUS ID	kV	THD _v (%)	ORDE (%)							
			5	7	11	13	17	19	23	25
HSB-SS6-01A	11.06	11.47	0.92	4.64	4.65	2.34	4.09	3.20	5.60	4.84
HSB-SS6-01B	11.06	11.47	0.92	4.64	4.65	2.34	4.09	3.20	5.60	4.84
HSB-SS7-01A	11.06	11.48	1.01	4.65	4.65	2.33	4.08	3.20	5.60	4.85
HSB-SS7-01B	11.06	11.48	1.01	4.65	4.65	2.33	4.08	3.20	5.60	4.85

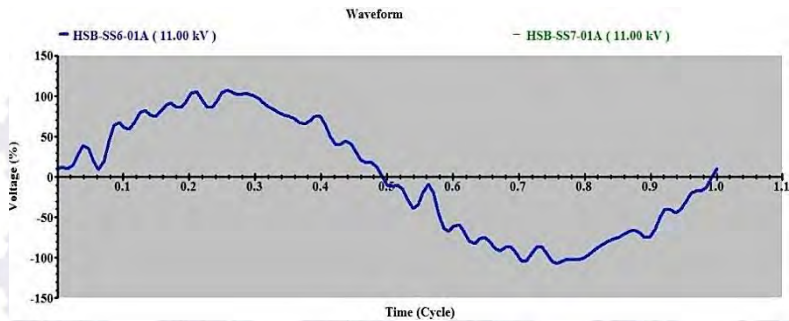
Tabel 4.12 Persentase Harmonisa Terhadap Arus Fundamental pada Orde Tertentu Setelah Pemasangan Filter Orde 5

ID	Arus (A)	THDi (%)	ORDE (%)							
			5	7	11	13	17	19	23	25
Cable 11	373.7	52.81	51.96	6.37	5.30	2.26	2.77	1.75	1.83	1.17
Cable 22	474.4	44.69	41.44	13.86	7.26	2.88	3.37	2.19	2.65	1.86

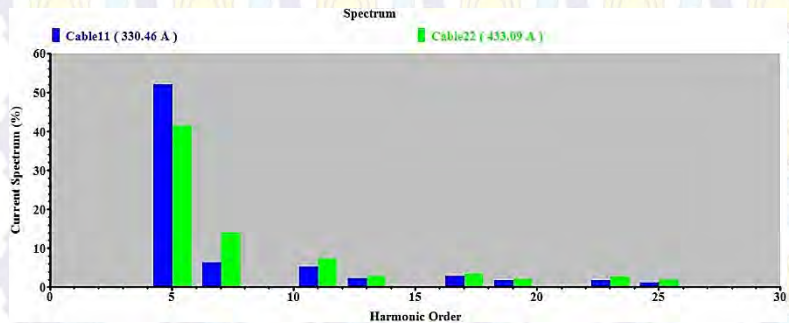
Pada tabel 4.11 dan 4.12 diatas terlihat bahwa distorsi harmonisa individual tegangan pada orde 5 telah memenuhi standar yang ditentukan. Namun untuk orde 7 dan seterusnya masih melebihi batas yang ditentukan. Sedangkan untuk harmonisa arus nilai THDi dan individual harmonik pada semua orde masih melebihi dari batas yang ditentukan. Oleh karena itu perlu pemasangan kembali filter pada orde selanjutnya.



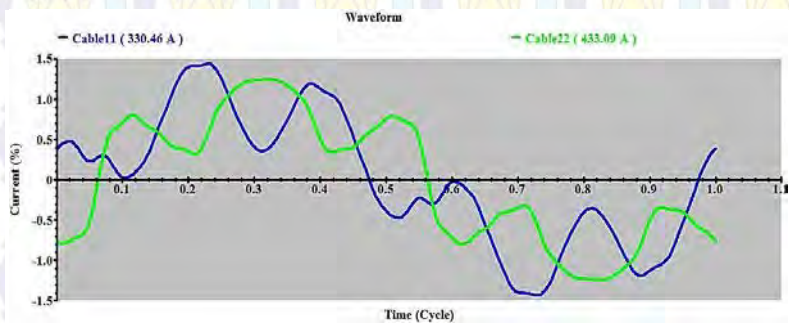
Gambar 4.11 Diagram Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 5



Gambar 4.12 Gelombang Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 5



Gambar 4.13 Diagram Arus pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 5



Gambar 4.14 Gelombang Arus pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 5

Berdasarkan gambar 4.12 dan 4.14, Bentuk gelombang tegangan sistem masih menunjukkan adanya *ripple* dan belum berbentuk sinus murni. Sedangkan pada gelombang arus belum menunjukkan adanya perubahan yang berarti dan masih terjadi distorsi yang cukup besar.

4.3.2 Perhitungan dan Pemasangan Filter Pasif Orde 7 pada *Network SS-6*

$$kVAR = 213 \quad (4.8)$$

$$C = \frac{kVAR}{\omega_0 \times V_{LL}^2} \quad (4.9)$$

$$C = \frac{213}{(2\pi \times 50) \times (11)^2} = 5.603 \mu F \quad (4.10)$$

$$L = \frac{1}{(2\pi \times 50 \times 7)^2 \times 5.603 \times 10^{-6}} = 3.694 \times 10^{-2} H \quad (4.11)$$

$$X_L = 2\pi \times 50 \times 8.6299 \times 10^{-2} = 11.5998 \Omega \quad (4.12)$$

$$Q_{factor} = 30 \quad (4.13)$$

$$R = \frac{11.5998}{30} = 0.3866 \Omega \quad (4.14)$$

Berikut ditampilkan data persentase harmonisa pada bus dan kabel setelah pemasangan filter orde 7 pada *network SS-6*.

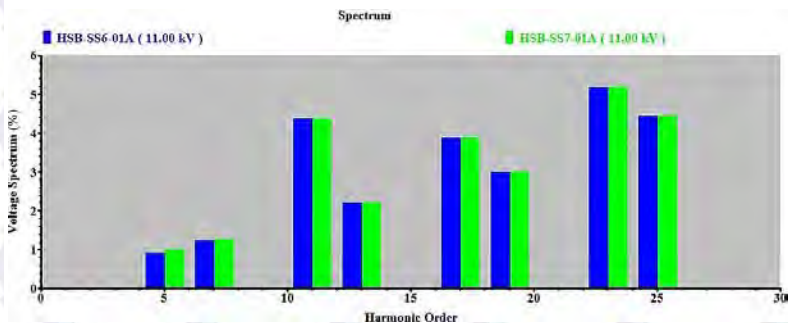
Tabel 4.13 Persentase Harmonisa Terhadap Tegangan Fundamental pada Orde Tertentu Setelah Pemasangan Filter Orde 7

BUS ID	kV	THD _v (%)	ORDE (%)							
			5	7	11	13	17	19	23	25
HSB-SS6-01A	11.04	9.85	0.92	1.23	4.36	2.20	3.86	3.01	5.19	4.44
HSB-SS6-01B	11.04	9.85	0.92	1.23	4.36	2.20	3.86	3.01	5.19	4.44
HSB-SS7-01A	11.05	9.86	1.00	1.26	4.36	2.20	3.86	3.01	5.19	4.45
HSB-SS7-01B	11.05	9.86	1.00	1.26	4.36	2.20	3.86	3.01	5.19	4.45

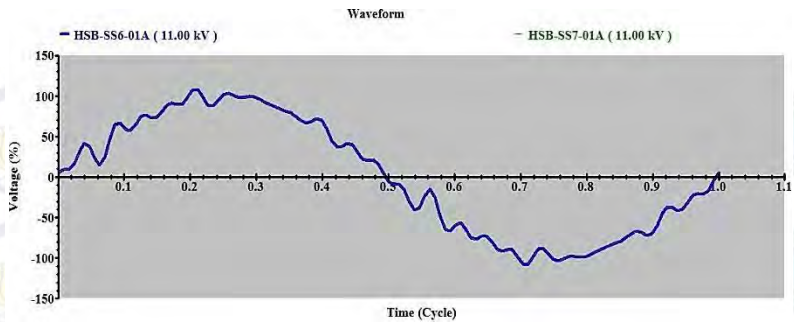
Tabel 4.14 Persentase Harmonisa Terhadap Arus Fundamental pada Orde Tertentu Setelah Pemasangan Filter Orde 7

ID	Arus (A)	THDi (%)	ORDE (%)							
			5	7	11	13	17	19	23	25
Cable 11	375.6	54.74	52.13	15.59	4.45	1.95	2.41	1.51	1.51	0.95
Cable 22	474.2	44.62	41.44	13.66	7.24	2.87	3.34	2.17	2.60	1.82

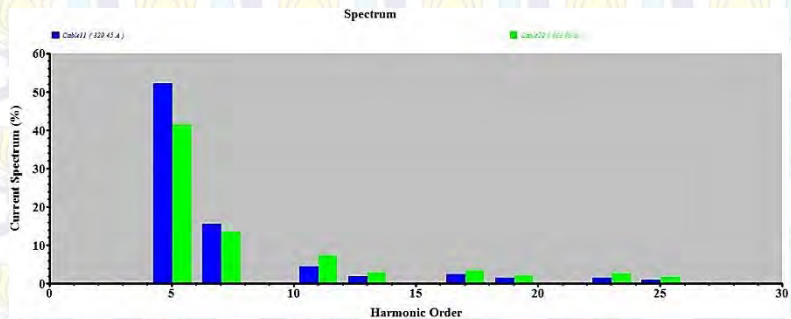
Hasil yang diperoleh berdasarkan tabel 4.13 dan 4.14 diatas menunjukkan terjadi penurunan nilai THDv yang cukup signifikan. Selain itu, nilai individual harmonisa tegangan pada orde 7 juga telah memenuhi standar yang ditentukan. Namun pada orde 11 dan seterusnya, nilai individual harmonisa tegangan masih melebihi batas yang ditentukan. Sedangkan untuk harmonisa arus nilai THDi dan individual harmonik pada semua orde masih melebihi dari batas yang ditentukan. Oleh karena itu perlu pemasangan kembali filter pada orde selanjutnya. Berikut adalah gambar diagram dan bentuk gelombang hasil proses *filtering* pada orde 7.



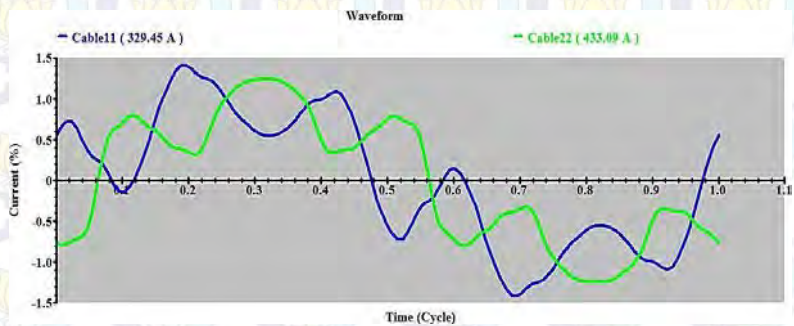
Gambar 4.15 Diagram Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 7



Gambar 4.16 Gelombang Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 7



Gambar 4.17 Gelombang Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 7



Gambar 4.18 Gelombang Arus pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 7

Pada gambar 4.16 menunjukkan bentuk gelombang tegangan yang terdistorsi sudah mulai kembali berbentuk sinusoidal namun masih terdapat *ripple*. Sedangkan pada gambar 4.17 dan 4.18 terlihat bahwa distorsi harmonisa arus didominasi oleh orde kelima dan ketujuh.

4.3.3 Perhitungan dan Pemasangan Filter Pasif Orde 11 pada Network SS-6

$$kVAR = 259 \quad (4.15)$$

$$C = \frac{kVAR}{\omega_0 \times V_{LL}^2} \quad (4.16)$$

$$C = \frac{259}{(2\pi \times 50) \times (11)^2} = 6.813 \mu F \quad (4.17)$$

$$L = \frac{1}{(2\pi \times 50 \times 11)^2 \times 6.813 \times 10^{-6}} = 1.2303 \times 10^{-2} H \quad (4.18)$$

$$X_L = 2\pi \times 50 \times 1.2303 \times 10^{-2} = 3.8631 \Omega \quad (4.19)$$

$$Q_{factor} = 30 \quad (4.20)$$

$$R = \frac{3.8631}{30} = 0.1287 \Omega \quad (4.21)$$

Berikut ditampilkan data persentase harmonisa pada bus dan kabel setelah pemasangan filter orde 11 pada *network* SS-6.

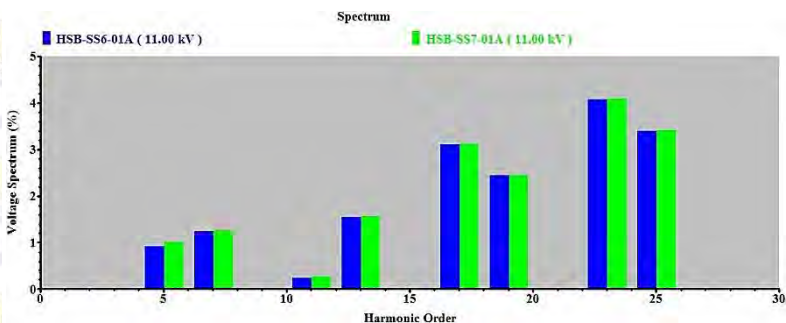
Tabel 4.15 Persentase Harmonisa Terhadap Tegangan Fundamental pada Orde Tertentu Setelah Pemasangan Filter Orde 11

BUS ID	kV	THD _v (%)	ORDE (%)							
			5	7	11	13	17	19	23	25
HSB-SS6-01A	11.02	6.97	0.92	1.23	0.23	1.55	3.11	2.43	4.10	3.40
HSB-SS6-01B	11.02	6.97	0.92	1.23	0.23	1.55	3.11	2.43	4.10	3.40
HSB-SS7-01A	11.02	7.01	1.00	1.26	0.26	1.56	3.12	2.44	4.10	3.41
HSB-SS7-01B	11.02	7.01	1.00	1.26	0.26	1.56	3.12	2.44	4.10	3.41

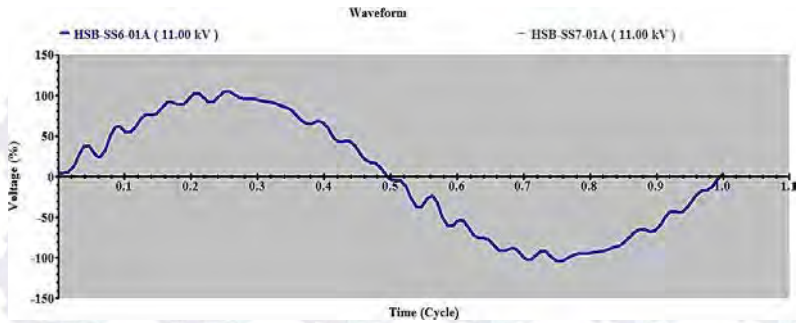
Tabel 4.16 Persentase Harmonisa Terhadap Arus Fundamental pada Orde Tertentu Setelah Pemasangan Filter Orde 11

ID	Arus (A)	THDi (%)	ORDE (%)							
			5	7	11	13	17	19	23	25
Cable 11	375.7	55.31	52.26	15.73	8.74	0.56	1.26	0.80	0.74	0.49
Cable 22	474.1	44.54	41.44	13.66	6.94	2.82	3.27	2.10	2.47	1.71

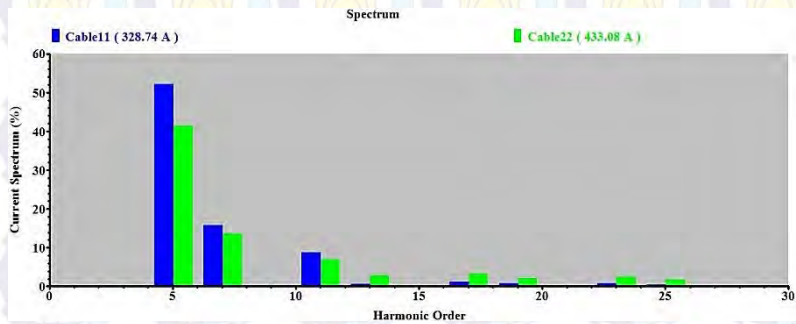
Pada tabel 4.15 dan 4.16 diatas terlihat bahwa distorsi harmonisa individual tegangan pada orde 11 telah memenuhi standar yang ditentukan. Namun untuk individual tegangan pada orde 17 dan seterusnya masih melebihi batas yang ditentukan. Sedangkan untuk harmonisa arus nilai THDi dan individual harmonik pada semua orde masih melebihi dari batas yang ditentukan. Oleh karena itu perlu pemasangan kembali filter pada orde selanjutnya. Berikut adalah gambar diagram dan bentuk gelombang hasil proses *filtering* pada orde 11.



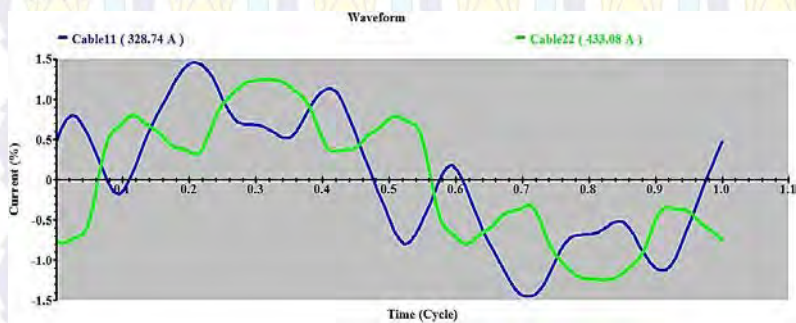
Gambar 4.19 Diagram Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 11



Gambar 4.20 Gelombang Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 11



Gambar 4.21 Gelombang Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 11



Gambar 4.22 Gelombang Arus pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 11

Berdasarkan gambar 4.19 dan 4.20, Bentuk gelombang tegangan sistem semakin menuju ke bentuk sinusoidal. Sedangkan pada gelombang arus belum menunjukkan adanya perubahan yang berarti dan masih terjadi distorsi harmonisa yang cukup besar.

4.3.4 Perhitungan dan Pemasangan Filter Pasif Orde 17 pada *Network SS-6*

$$kVAR = 46 \quad (4.22)$$

$$C = \frac{kVAR}{\omega_0 \times V_{LL}^2} \quad (4.23)$$

$$C = \frac{46}{(2\pi \times 50) \times (11)^2} = 1.21 \mu F \quad (4.24)$$

$$L = \frac{1}{(2\pi \times 50 \times 17)^2 \times 1.21 \times 10^{-6}} = 2.9003 \times 10^{-2} H \quad (4.25)$$

$$X_L = 2\pi \times 50 \times 2.9003 \times 10^{-2} = 9.1072 \Omega \quad (4.26)$$

$$Q_{factor} = 30 \quad (4.27)$$

$$R = \frac{9.1072}{30} = 0.3035 \Omega \quad (4.28)$$

Berikut ditampilkan data persentase harmonisa pada bus dan kabel setelah pemasangan filter orde 17 pada *network SS-6*.

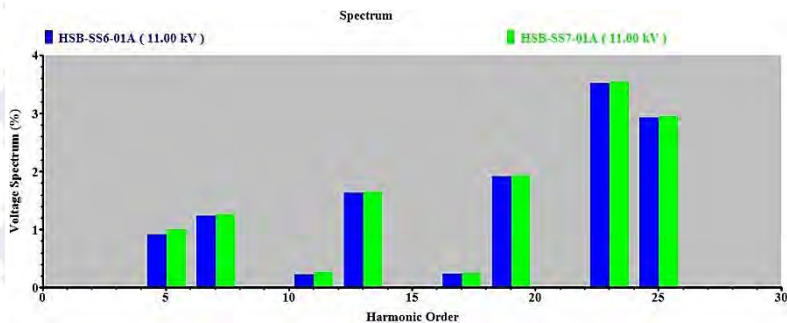
Tabel 4.17 Persentase Harmonisa Terhadap Tegangan Fundamental pada Orde Tertentu Setelah Pemasangan Filter Orde 17

BUS ID	kV	THD _v (%)	ORDE (%)							
			5	7	11	13	17	19	23	25
HSB-SS6-01A	11.01	5.46	0.92	1.23	0.23	1.63	0.24	1.91	3.52	2.93
HSB-SS6-01B	11.01	5.46	0.92	1.23	0.23	1.63	0.24	1.91	3.52	2.93
HSB-SS7-01A	11.01	5.51	1.00	1.26	0.26	1.64	0.26	1.92	3.53	2.94
HSB-SS7-01B	11.01	5.51	1.00	1.26	0.26	1.64	0.26	1.92	3.53	2.94

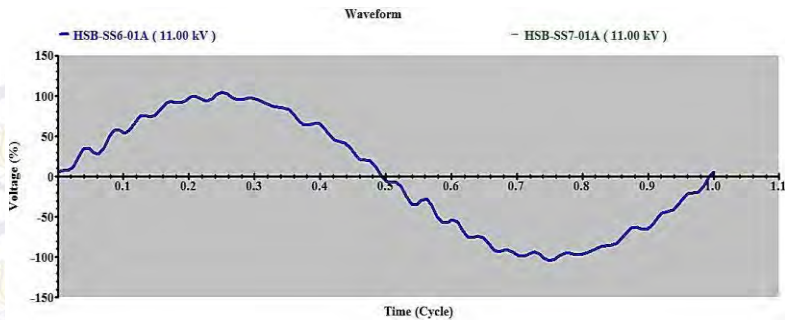
Tabel 4.18 Persentase Harmonisa Terhadap Arus Fundamental pada Orde Tertentu Setelah Pemasangan Filter Orde 17

ID	Arus (A)	THDi (%)	ORDE (%)							
			5	7	11	13	17	19	23	25
Cable 11	375.8	55.42	52.28	15.74	8.75	0.68	3.62	0.33	0.48	0.43
Cable 22	474.0	44.51	41.44	13.66	6.94	2.83	2.93	2.04	2.40	1.65

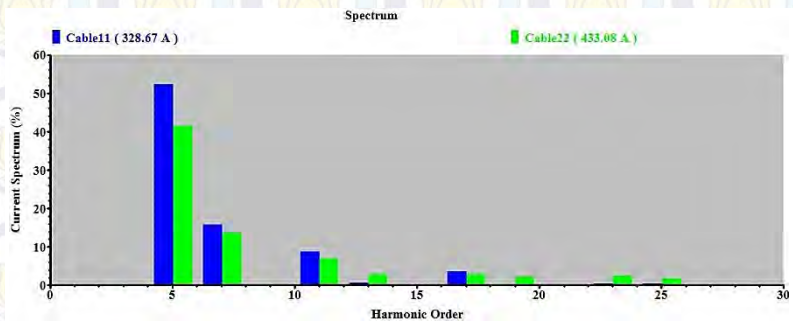
Hasil yang diperoleh berdasarkan tabel 4.17 dan 4.18 diatas menunjukkan terjadi penurunan nilai THDv yang cukup signifikan. Selain itu, nilai individual harmonisa tegangan pada orde 17 juga telah memenuhi standar yang ditentukan. Namun pada orde 23 dan seterusnya, nilai individual harmonisa tegangan masih melebihi batas yang ditentukan. Sedangkan untuk harmonisa arus nilai THDi dan individual harmonik pada semua orde masih melebihi dari batas yang ditentukan. Oleh karena itu perlu pemasangan kembali filter pada orde selanjutnya. Berikut adalah gambar diagram dan bentuk gelombang hasil proses *filtering* pada orde 17.



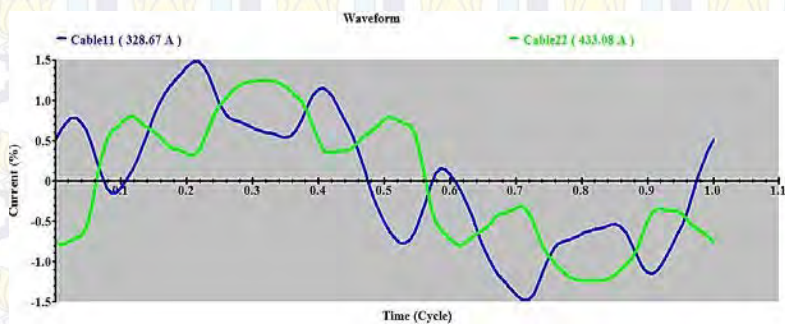
Gambar 4.23 Diagram Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 17



Gambar 4.24 Gelombang Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 17



Gambar 4.25 Gelombang Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 17



Gambar 4.26 Gelombang Arus pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 17

Pada gambar 4.24 menunjukkan bentuk gelombang tegangan yang terdistorsi sudah semakin *smooth* namun masih terdapat sedikit *ripple*. Sedangkan pada gambar 4.25 dan 4.26 terlihat bahwa distorsi harmonisa arus didominasi oleh orde kelima dan ketujuh.

4.3.5 Perhitungan dan Pemasangan Filter Pasif Orde 23 pada Network SS-6

$$\text{kVAR} = 38 \quad (4.29)$$

$$C = \frac{\text{kVAR}}{\omega_0 \times V_{LL}^2} \quad (4.30)$$

$$C = \frac{38}{(2\pi \times 50) \times (11)^2} = 1 \mu\text{F} \quad (4.31)$$

$$L = \frac{1}{(2\pi \times 50 \times 23)^2 \times 1 \times 10^{-6}} = 1.9172 \times 10^{-2} \text{ H} \quad (4.32)$$

$$X_L = 2\pi \times 50 \times 1.9172 \times 10^{-2} = 6.0202 \Omega \quad (4.33)$$

$$Q_{\text{factor}} = 30 \quad (4.34)$$

$$R = \frac{6.0202}{30} = 0.2006 \Omega \quad (4.35)$$

Berikut ditampilkan data persentase harmonisa pada bus dan kabel setelah pemasangan filter orde 23 pada *network* SS-6.

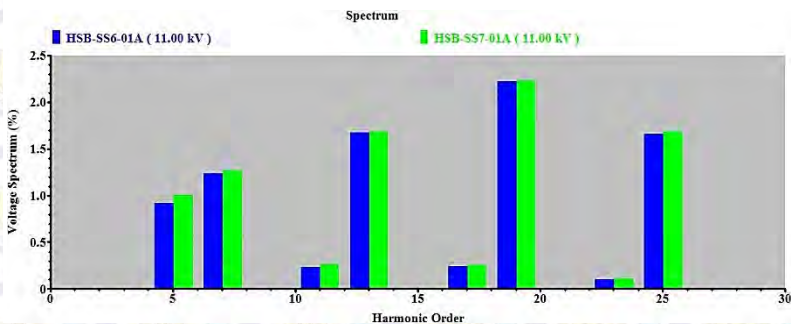
Tabel 4.19 Persentase Harmonisa Terhadap Tegangan Fundamental pada Orde Tertentu Setelah Pemasangan Filter Orde 23

BUS ID	kV	THDv (%)	ORDE (%)							
			5	7	11	13	17	19	23	25
HSB-SS6-01A	11	3.61	0.92	1.23	0.23	1.68	0.24	2.22	0.10	1.66
HSB-SS6-01B	11	3.61	0.92	1.23	0.23	1.63	0.24	1.91	3.52	2.93
HSB-SS7-01A	11	3.66	1.00	1.26	0.26	1.68	0.26	2.22	0.11	1.68
HSB-SS7-01B	11	3.66	1.00	1.26	0.26	1.64	0.26	1.92	3.53	2.94

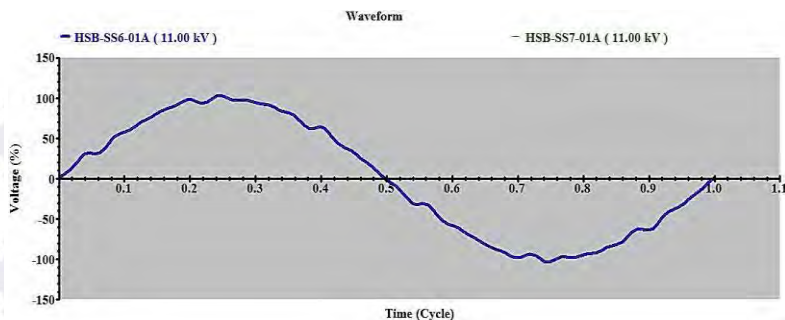
Tabel 4.20 Persentase Harmonisa Terhadap Arus Fundamental pada Orde Tertentu Setelah Pemasangan Filter Orde 23

ID	Arus (A)	THDi (%)	ORDE (%)							
			5	7	11	13	17	19	23	25
Cable 11	375.8	55.49	52.29	15.76	8.75	0.77	3.63	0.55	2.43	0.81
Cable 22	470.0	44.48	41.44	13.66	6.94	2.83	2.93	2.08	1.89	1.47

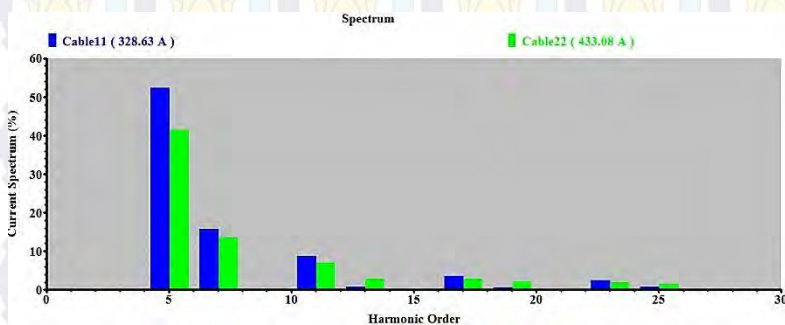
Pada tabel 4.19 dan 4.20 diatas terlihat bahwa THDv dan semua orde distorsi harmonisa individual tegangan telah memenuhi standar yang ditentukan. Sedangkan untuk harmonisa arus nilai THDi dan individual harmonik pada semua orde masih melebihi dari batas yang ditentukan. Oleh karena itu perlu pemasangan kembali filter pada network SS-7. Berikut adalah gambar diagram dan bentuk gelombang hasil proses *filtering* pada orde 11.



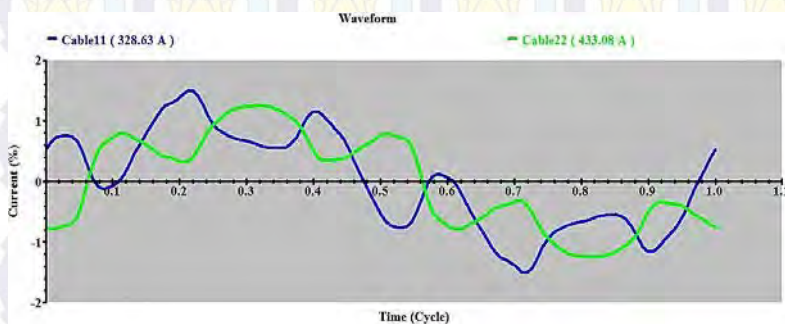
Gambar 4.27 Diagram Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 23



Gambar 4.28 Gelombang Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 23



Gambar 4.29 Gelombang Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 23



Gambar 4.30 Gelombang Arus pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 23

Berdasarkan gambar 4.27 dan 4.28, Bentuk gelombang tegangan telah semakin halus dan berbentuk sinusoidal. Sedangkan pada gelombang arus belum menunjukkan adanya perubahan yang berarti dan masih terjadi distorsi harmonisa yang cukup besar.

4.3.6 Perhitungan dan Pemasangan Filter Pasif Orde 5 pada *Network SS-7*

$$kVAR = 1787 \quad (4.36)$$

$$C = \frac{kVAR}{\omega_0 \times V_{LL}^2} \quad (4.37)$$

$$C = \frac{1787}{(2\pi \times 50) \times (11)^2} = 47.01 \mu F \quad (4.38)$$

$$L = \frac{1}{(2\pi \times 50 \times 5)^2 \times 47.01 \times 10^{-6}} = 8.6299 \times 10^{-3} H \quad (4.39)$$

$$X_L = 2\pi \times 50 \times 8.6299 \times 10^{-3} = 2.7098 \Omega \quad (4.40)$$

$$Q_{factor} = 30 \quad (4.41)$$

$$R = \frac{2.7098}{30} = 0.0903 \Omega \quad (4.42)$$

Berikut ditampilkan data persentase harmonisa pada bus dan kabel setelah pemasangan filter orde 5 pada *network SS-7*.

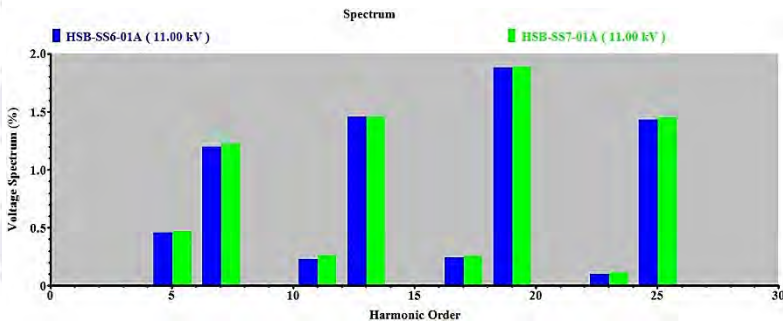
Tabel 4.21 Persentase Harmonisa Terhadap Tegangan Fundamental pada Orde Tertentu Setelah Pemasangan Filter Orde 5

BUS ID	kV	THD _v (%)	ORDE (%)							
			5	7	11	13	17	19	23	25
HSB-SS6-01A	11	3.08	0.46	1.19	0.23	1.46	0.24	1.88	0.10	1.43
HSB-SS6-01B	11	3.08	0.46	1.19	0.23	1.46	0.24	1.88	0.10	1.43
HSB-SS7-01A	11	3.10	0.47	1.22	0.26	1.46	0.25	1.88	0.11	1.45
HSB-SS7-01B	11	3.10	0.47	1.22	0.26	1.46	0.25	1.88	0.11	1.45

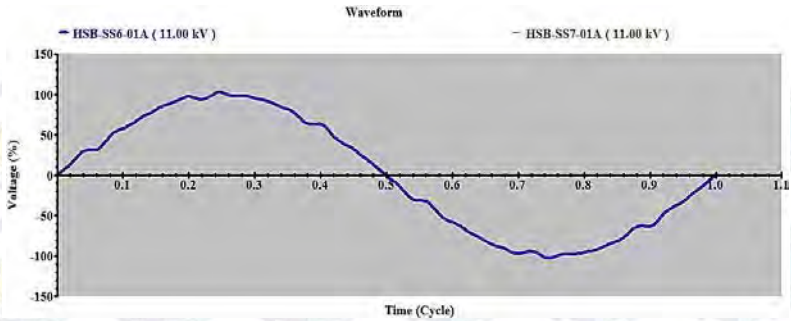
Tabel 4.22 Persentase Harmonisa Terhadap Arus Fundamental pada Orde Tertentu Setelah Pemasangan Filter Orde 23

ID	Arus (A)	THDi (%)	ORDE (%)							
			5	7	11	13	17	19	23	25
Cable 11	334.1	18.39	3.49	15.18	8.66	1.06	3.59	0.79	2.41	0.49
Cable 22	411.1	16.92	4.66	13.72	7.33	2.25	3.10	1.58	2.01	1.19

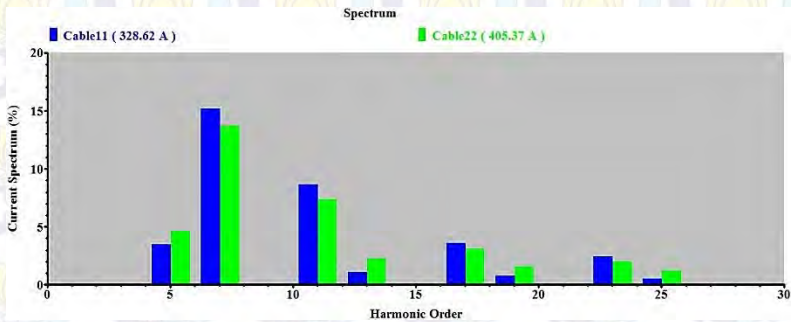
Hasil yang diperoleh berdasarkan tabel 4.21 dan 4.22 diatas menunjukkan terjadi penurunan nilai THDi yang cukup signifikan. Selain itu, nilai individual harmonisa arus pada orde 5 juga telah memenuhi standar yang ditentukan. Namun pada orde 7 dan seterusnya, nilai individual harmonisa arus masih melebihi batas yang ditentukan. Sedangkan untuk harmonisa tegangan nilai THDv dan individual harmonik pada semua orde telah memenuhi batas yang ditentukan. Pemasangan kembali filter pada orde selanjutnya diperlukan untuk menurunkan THDi. Berikut adalah gambar diagram dan bentuk gelombang hasil proses *filtering* pada orde 5.



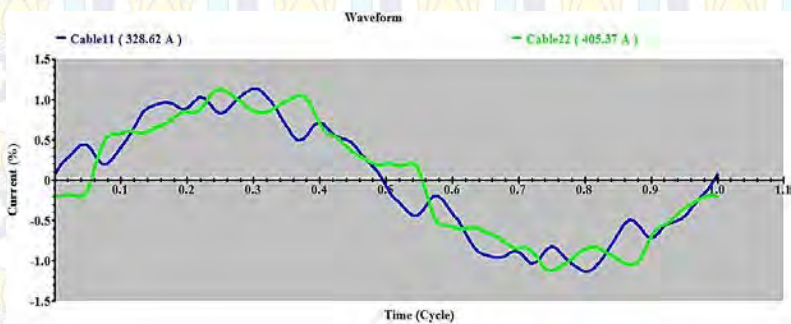
Gambar 4.31 Diagram Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 5



Gambar 4.32 Gelombang Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 5



Gambar 4.33 Diagram Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 5



Gambar 4.34 Gelombang Arus pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 25

Pada gambar 4.34 menunjukkan bentuk gelombang arus masih menunjukkan adanya *ripple* dan belum berbentuk sinus murni. Sedangkan pada gelombang tegangan menunjukkan gelombang sinusoidal yang semakin *smooth* (halus).

4.3.7 Perhitungan dan Pemasangan Filter Pasif Orde 7 pada Network SS-7

$$\text{kVAR} = 103 \quad (4.43)$$

$$C = \frac{\text{kVAR}}{\omega_0 \times V_{LL}^2} \quad (4.44)$$

$$C = \frac{103}{(2\pi \times 50) \times (11)^2} = 2.71 \mu\text{F} \quad (4.45)$$

$$L = \frac{1}{(2\pi \times 50 \times 7)^2 \times 2.71 \times 10^{-6}} = 7.637 \times 10^{-2} \text{ H} \quad (4.46)$$

$$X_L = 2\pi \times 50 \times 7.637 \times 10^{-2} = 23.983 \Omega \quad (4.47)$$

$$Q_{\text{factor}} = 30 \quad (4.48)$$

$$R = \frac{23.983}{30} = 0.7994 \Omega \quad (4.49)$$

Berikut ditampilkan data persentase harmonisa pada bus dan kabel setelah pemasangan filter orde 7 pada *network* SS-7.

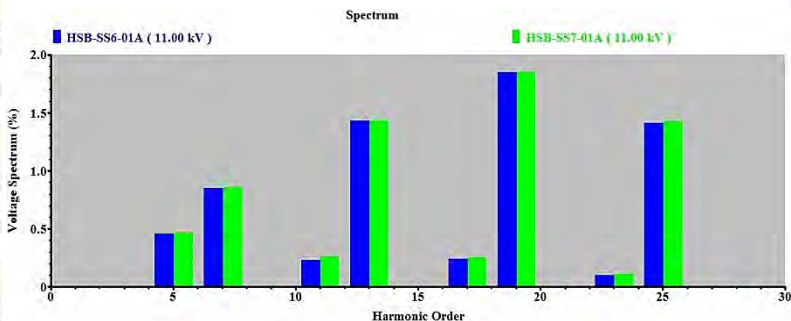
Tabel 4.23 Persentase Harmonisa Terhadap Tegangan Fundamental pada Orde Tertentu Setelah Pemasangan Filter Orde 7

BUS ID	kV	THD _v (%)	ORDE (%)							
			5	7	11	13	17	19	23	25
HSB-SS6-01A	11	2.92	0.46	0.85	0.23	1.43	0.24	1.85	0.10	1.41
HSB-SS6-01B	11	2.92	0.46	0.85	0.23	1.43	0.24	1.85	0.10	1.41
HSB-SS7-01A	11	2.94	0.47	0.86	0.26	1.43	0.25	1.85	0.11	1.42
HSB-SS7-01B	11	2.94	0.47	0.86	0.26	1.43	0.25	1.85	0.11	1.42

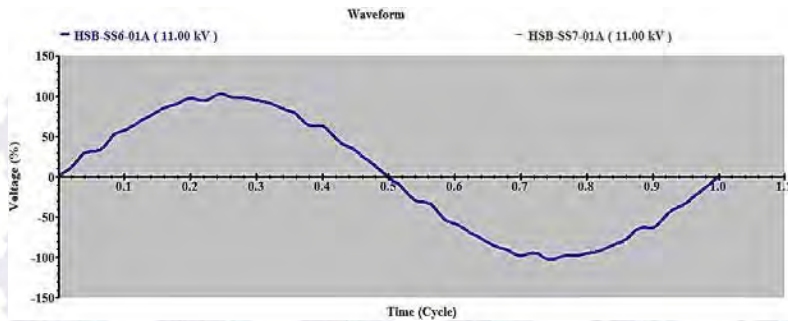
Tabel 4.24 Persentase Harmonisa Terhadap Arus Fundamental pada Orde Tertentu Setelah Pemasangan Filter Orde 7

ID	Arus (A)	THDi (%)	ORDE (%)							
			5	7	11	13	17	19	23	25
Cable 11	331.0	12.00	3.50	6.02	8.65	1.09	3.59	0.82	2.41	0.46
Cable 22	407.2	11.66	4.69	6.17	7.34	2.16	3.10	1.52	2.01	1.16

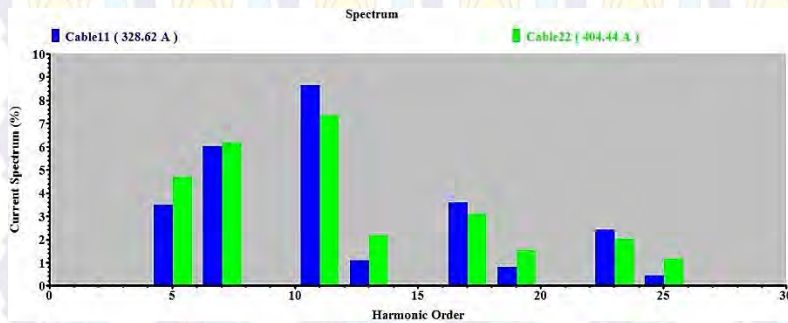
Pada tabel 4.23 dan 4.24 diatas terlihat bahwa distorsi harmonisa individual arus pada orde 7 telah memenuhi standar yang ditentukan. Namun untuk individual tegangan pada orde 11 dan seterusnya masih melebihi batas yang ditentukan. Begitu juga dengan nilai THDi yang masih melebihi standar yang ditentukan. Sedangkan untuk harmonisa tegangan nilai THDv dan individual harmonik pada semua orde telah memenuhi batas yang ditentukan. Pemasangan kembali filter pada orde selanjutnya diperlukan untuk menurunkan THDi. Berikut adalah gambar diagram dan bentuk gelombang hasil proses *filtering* pada orde 7.



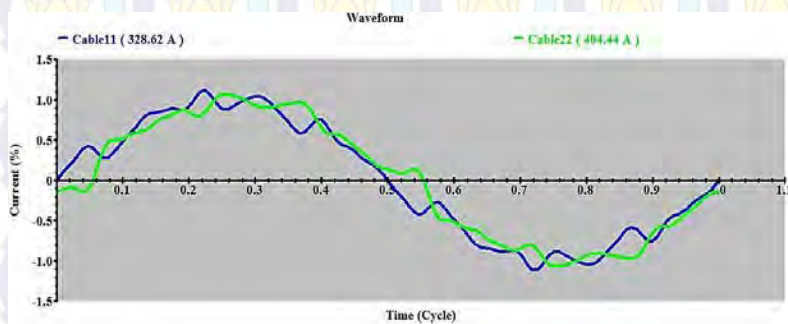
Gambar 4.35 Diagram Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 7



Gambar 4.36 Gelombang Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 7



Gambar 4.37 Diagram Arus pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 7



Gambar 4.38 Gelombang Arus pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 7

Berdasarkan gambar 4.37 dan 4.38, Bentuk gelombang arus sistem semakin menuju ke bentuk sinusoidal. Namun masih terdapat *ripple*. Sedangkan pada gelombang tegangan, dengan menurunnya nilai THDv maka bentuk gelombang sinusoidal semakin *smooth* (halus).

4.3.8 Perhitungan dan Pemasangan Filter Pasif Orde 11 pada Network SS-7

$$kVAR = 103 \quad (4.50)$$

$$C = \frac{kVAR}{\omega_0 \times V_{LL}^2} \quad (4.51)$$

$$C = \frac{103}{(2\pi \times 50) \times (11)^2} = 2.71 \mu F \quad (4.52)$$

$$L = \frac{1}{(2\pi \times 50 \times 7)^2 \times 2.71 \times 10^{-6}} = 7.637 \times 10^{-2} H \quad (4.53)$$

$$X_L = 2\pi \times 50 \times 7.637 \times 10^{-2} = 9.7121 \Omega \quad (4.54)$$

$$Q_{factor} = 30 \quad (4.55)$$

$$R = \frac{23.983}{30} = 0.3237 \Omega \quad (4.56)$$

Berikut ditampilkan data persentase harmonisa pada bus dan kabel setelah pemasangan filter orde 11 pada *network* SS-7.

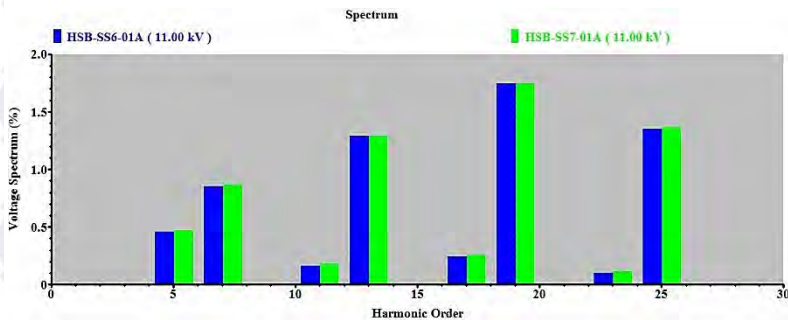
Tabel 4.25 Persentase Harmonisa Terhadap Tegangan Fundamental pada Orde Tertentu Setelah Pemasangan Filter Orde 11

BUS ID	kV	THDv (%)	ORDE (%)							
			5	7	11	13	17	19	23	25
HSB-SS6-01A	10.99	2.75	0.46	0.85	0.16	1.29	0.24	1.74	0.10	1.35
HSB-SS6-01B	10.99	2.75	0.46	0.85	0.16	1.29	0.24	1.74	0.10	1.35
HSB-SS7-01A	11	2.77	0.47	0.86	0.18	1.29	0.25	1.74	0.11	1.36
HSB-SS7-01B	11	2.77	0.47	0.86	0.18	1.29	0.25	1.74	0.11	1.36

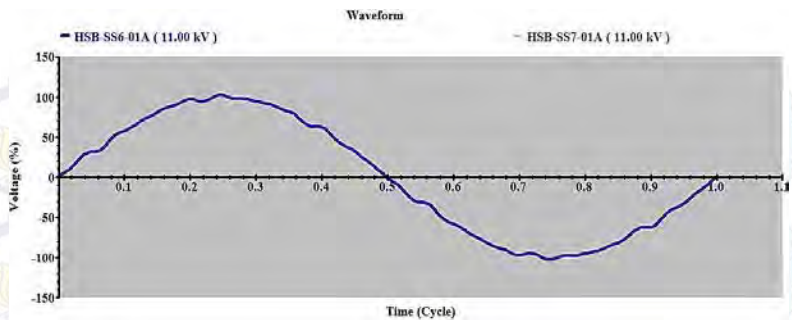
Tabel 4.26 Persentase Harmonisa Terhadap Arus Fundamental pada Orde Tertentu Setelah Pemasangan Filter Orde 11

ID	Arus (A)	THDi (%)	ORDE (%)							
			5	7	11	13	17	19	23	25
Cable 11	330.0	9.13	3.50	6.02	3.69	1.31	3.57	0.90	2.41	0.37
Cable 22	405.4	9.54	4.71	6.23	3.27	1.67	3.09	1.32	2.01	1.06

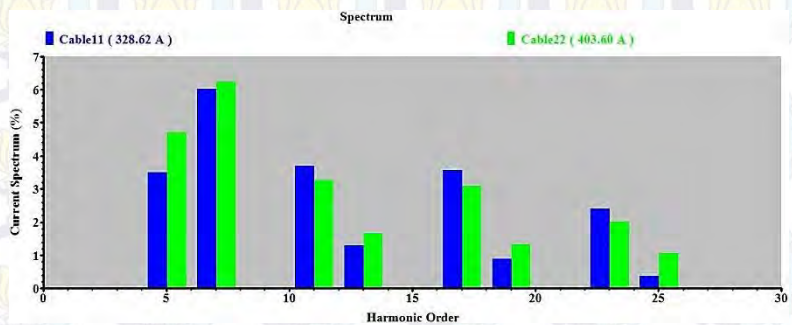
Hasil yang diperoleh berdasarkan tabel 4.25 dan 4.26 diatas menunjukkan terjadi penurunan nilai THDi yang cukup signifikan. Selain itu, nilai individual harmonisa arus pada orde 11 juga telah memenuhi standar yang ditentukan. Namun pada orde 17 dan seterusnya, nilai individual harmonisa arus masih melebihi batas yang ditentukan. Sedangkan untuk harmonisa tegangan nilai THDv dan individual harmonik pada semua orde telah memenuhi batas yang ditentukan. Pemasangan kembali filter pada orde selanjutnya diperlukan untuk menurunkan THDi. Berikut adalah gambar diagram dan bentuk gelombang hasil proses *filtering* pada orde 11.



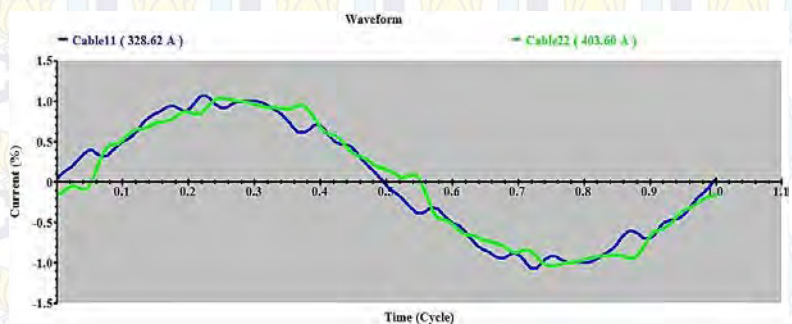
Gambar 4.39 Diagram Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 11



Gambar 4.40 Gelombang Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 11



Gambar 4.41 Diagram Arus pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 11



Gambar 4.42 Gelombang Arus pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 11

Pada gambar 4.40 menunjukkan bentuk gelombang arus masih menunjukkan adanya *ripple* dan belum berbentuk sinus murni. Sedangkan pada gelombang tegangan menunjukkan gelombang sinusoidal yang semakin *smooth* (halus).

4.3.9 Perhitungan dan Pemasangan Filter Pasif Orde 17 pada Network SS-7

$$\text{kVAR} = 84 \quad (4.57)$$

$$C = \frac{\text{kVAR}}{\omega_0 \times V_{LL}^2} \quad (4.58)$$

$$C = \frac{46}{(2\pi \times 50) \times (11)^2} = 2.21 \mu\text{F} \quad (4.59)$$

$$L = \frac{1}{(2\pi \times 50 \times 17)^2 \times 2.21 \times 10^{-6}} = 1.588 \times 10^{-2} \text{ H} \quad (4.60)$$

$$X_L = 2\pi \times 50 \times 2.9003 \times 10^{-2} = 4.9863 \Omega \quad (4.61)$$

$$Q_{\text{factor}} = 30 \quad (4.62)$$

$$R = \frac{4.9863}{30} = 0.1662 \Omega \quad (4.63)$$

Berikut ditampilkan data persentase harmonisa pada bus dan kabel setelah pemasangan filter orde 17 pada *network* SS-7.

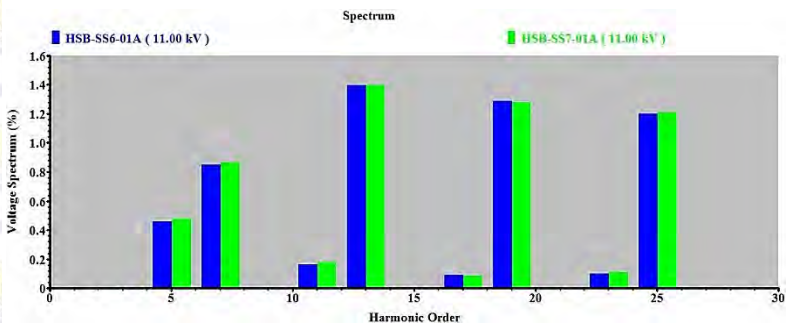
Tabel 4.27 Persentase Harmonisa Terhadap Tegangan Fundamental pada Orde Tertentu Setelah Pemasangan Filter Orde 17

BUS ID	kV	THD _v (%)	ORDE (%)							
			5	7	11	13	17	19	23	25
HSB-SS6-01A	10.99	2.46	0.46	0.85	0.16	1.40	0.09	1.29	0.10	1.20
HSB-SS6-01B	10.99	2.46	0.46	0.85	0.16	1.40	0.09	1.29	0.10	1.20
HSB-SS7-01A	11	2.47	0.47	0.86	0.18	1.40	0.08	1.28	0.11	1.21
HSB-SS7-01B	11	2.47	0.47	0.86	0.18	1.40	0.08	1.28	0.11	1.21

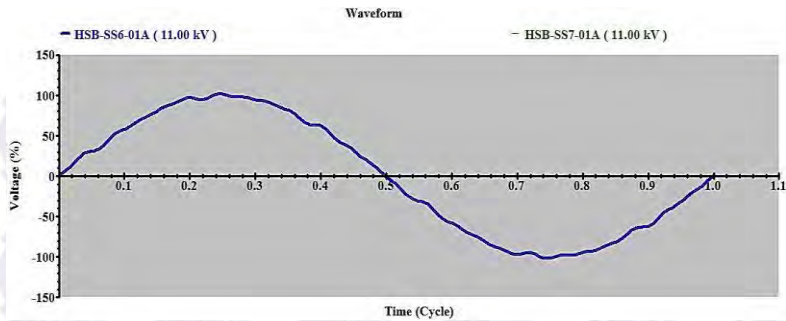
Tabel 4.28 Persentase Harmonisa Terhadap Arus Fundamental pada Orde Tertentu Setelah Pemasangan Filter Orde 17

ID	Arus (A)	THDi (%)	ORDE (%)							
			5	7	11	13	17	19	23	25
Cable 11	329.8	8.51	3.50	6.02	3.70	1.15	1.18	1.31	2.39	0.16
Cable 22	404.6	9.07	4.72	6.26	3.29	2.05	0.89	0.49	2.00	0.82

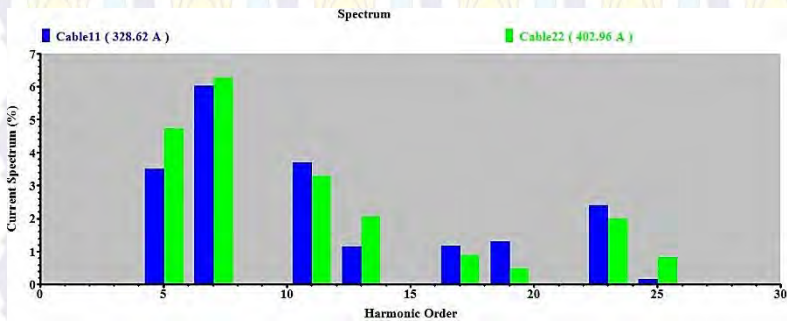
Pada tabel 4.27 dan 4.28 diatas terlihat bahwa distorsi harmonisa individual arus pada orde 17 telah memenuhi standar yang ditentukan. Namun untuk individual tegangan pada orde 23 dan seterusnya masih melebihi batas yang ditentukan. Begitu juga dengan nilai THDi yang masih melebihi standar yang ditentukan. Sedangkan untuk harmonisa tegangan nilai THDv dan individual harmonik pada semua orde telah memenuhi batas yang ditentukan. Pemasangan kembali filter pada orde selanjutnya diperlukan untuk menurunkan THDi. Berikut adalah gambar diagram dan bentuk gelombang hasil proses *filtering* pada orde 17.



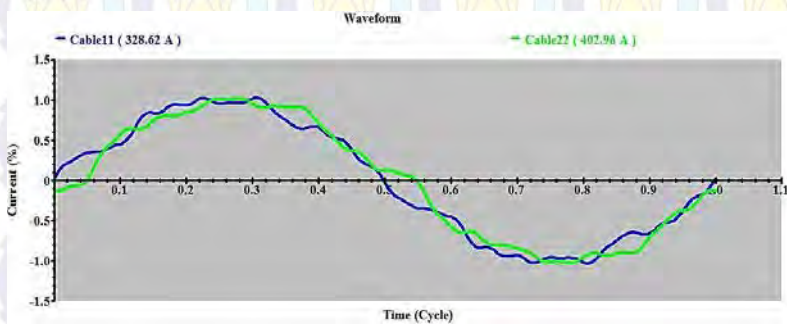
Gambar 4.43 Diagram Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 17



Gambar 4.44 Gelombang Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 17



Gambar 4.45 Diagram Arus pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 17



Gambar 4.46 Gelombang Arus pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 17

Berdasarkan gambar 4.43 dan 4.44, Bentuk gelombang arus sistem semakin menuju ke bentuk sinusoidal. Namun masih terdapat *ripple*. Sedangkan pada gelombang tegangan, dengan menurunnya nilai THDv maka bentuk gelombang sinusoidal semakin *smooth* (halus).

4.2.10 Perhitungan dan Pemasangan Filter Pasif Orde 23 pada Network SS-7

$$kVAR = 57 \quad (4.64)$$

$$C = \frac{kVAR}{\omega_0 \times V_{LL}^2} \quad (4.65)$$

$$C = \frac{38}{(2\pi \times 50) \times (11)^2} = 1.499 \mu F \quad (4.66)$$

$$L = \frac{1}{(2\pi \times 50 \times 23)^2 \times 1.499 \times 10^{-6}} = 1.279 \times 10^{-2} H \quad (4.67)$$

$$X_L = 2\pi \times 50 \times 1.279 \times 10^{-2} = 4.0161 \Omega \quad (4.68)$$

$$Q_{factor} = 30 \quad (4.69)$$

$$R = \frac{4.0161}{30} = 0.1338 \Omega \quad (4.70)$$

Berikut ditampilkan data persentase harmonisa pada bus dan kabel setelah pemasangan filter orde 23 pada *network* SS-7.

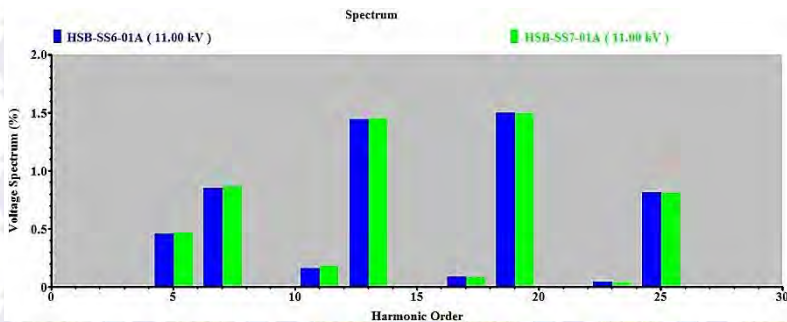
Tabel 4.29 Persentase Harmonisa Terhadap Tegangan Fundamental pada Orde Tertentu Setelah Pemasangan Filter Orde 23

BUS ID	kV	THDv (%)	ORDE (%)							
			5	7	11	13	17	19	23	25
HSB-SS6-01A	10.99	2.45	0.46	0.85	0.16	1.45	0.09	1.50	0.05	0.81
HSB-SS6-01B	10.99	2.45	0.46	0.85	0.16	1.45	0.09	1.50	0.05	0.81
HSB-SS7-01A	11	2.45	0.47	0.86	0.18	1.45	0.08	1.49	0.04	0.81
HSB-SS7-01B	11	2.45	0.47	0.86	0.18	1.45	0.08	1.49	0.04	0.81

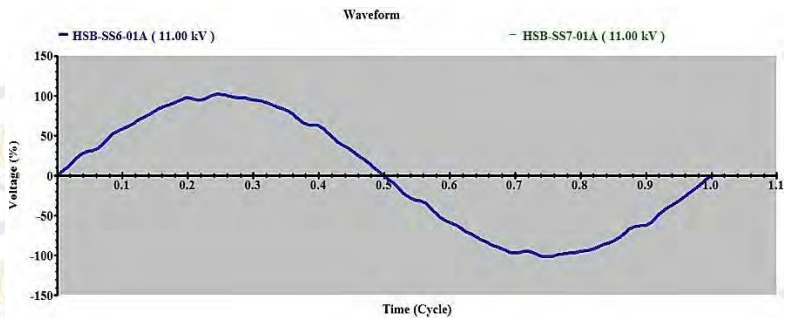
Tabel 4.30 Persentase Harmonisa Terhadap Arus Fundamental pada Orde Tertentu Setelah Pemasangan Filter Orde 23

ID	Arus (A)	THDi (%)	ORDE (%)							
			5	7	11	13	17	19	23	25
Cable 11	329.7	8.16	3.50	6.02	3.71	1.07	1.18	1.12	0.57	0.39
Cable 22	404.2	8.92	4.73	6.28	3.29	2.23	0.90	0.86	0.43	0.28

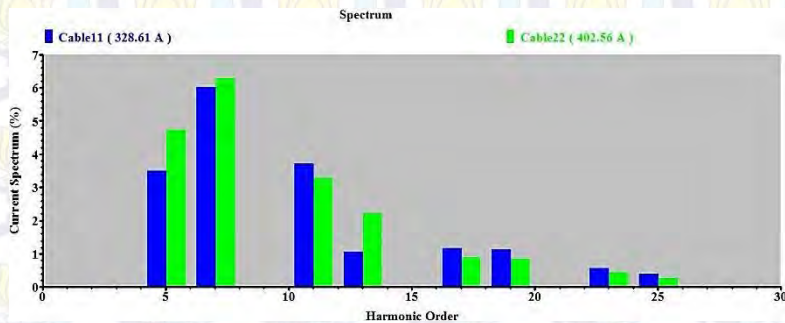
Hasil yang diperoleh berdasarkan tabel 4.29 dan 4.30 diatas menunjukkan terjadi penurunan nilai THDi yang cukup signifikan. Selain itu, nilai individual harmonisa arus pada orde 23 juga telah memenuhi standar yang ditentukan. Namun nilai THDi masih melebihi batas yang ditentukan. Sedangkan untuk harmonisa tegangan nilai THDv dan individual harmonik pada semua orde telah memenuhi batas yang ditentukan. Pada pemasangan filter ini, semua nilai individual harmonik baik tegangan maupun arus serta nilai THDv telah memenuhi standar yang ditetapkan. Namun pada data diatas didapat nilai THDi masih belum dapat sesuai dengan standar. Dalam hal ini, dapat dikatakan bahwa pemasangan filter pasif pada plant ini belum dapat menurunkan nilai THDi. Oleh karena itu selanjutnya ditambahkan filter aktif kedalam sistem untuk mengatasi permasalahan tersebut. Sehingga digunakan kombinasi antara kedua jenis filter tersebut. Kombinasi antara filter pasif dan aktif dapat disebut dengan filter hybrid. Berikut adalah gambar diagram dan bentuk gelombang hasil proses *filtering* pada orde 23.



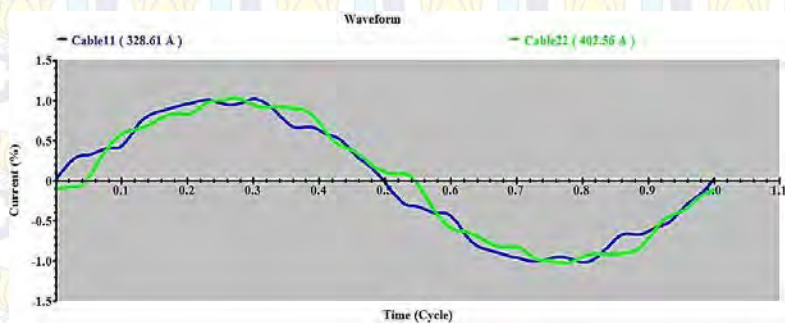
Gambar 4.47 Diagram Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 23



Gambar 4.48 Gelombang Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 23



Gambar 4.49 Diagram Arus pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 23



Gambar 4.50 Gelombang Arus pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter Orde 23

Pada gambar 4.49 dan 4.50 menunjukkan bentuk diagram dan gelombang arus. Pada diagram menunjukkan nilai individual arus harmonik masih tinggi pada orde kelima dan ketujuh. Pada bentuk gelombang arus juga masih menunjukkan adanya *ripple* dan belum berbentuk sinus murni. Sedangkan pada bentuk diagram tegangan, semua orde telah memenuhi standar. Selain itu, bentuk gelombang tegangan menunjukkan gelombang sinusoidal yang semakin *smooth* (halus).

4.4 Pemasangan dan Perhitungan Spesifikasi Filter Aktif

Pemasangan filter aktif pada *plant* Pakistan Deep Water Containeer Port dilakukan untuk meredam distorsi harmonisa yang tidak dapat teredam menggunakan filter pasif. Pada pemasangan filter pasif sebelumnya berhasil menurunkan nilai distorsi harmonisa individual baik tegangan dan arus serta THDv sesuai standar IEEE 519-1992. Untuk nilai THDi terbukti filter pasif belum dapat menurunkan sesuai dengan standar yang diperbolehkan. Pada tabel 4.27 setelah pemasangan filter pasif orde 23, nilai THDi masih berada pada 8.92% pada Bus HSB-SS7-01A. Berdasarkan perhitungan I_{sc}/I_L yang dilakukan di awal sebelum pemasangan filter untuk nilai I_{sc}/I_L antara 20-50 pada level tegangan 11 kV didapat batas maksimal nilai THDi pada Bus HSB-SS7-01A adalah sebesar 8%. Oleh sebab itu, perlu dilakukan pemasangan dan perhitungan spesifikasi filter aktif kedalam sistem sehingga dapat menurunkan atau bahkan menghilangkan semua sumber harmonisa yang terdapat pada *plant* tersebut.

Simulasi pembuatan filter aktif dilakukan pada *software* Psim dengan memasukkan data VFD yang terdapat pada ETAP. Pada tugas akhir ini, VFD yang dimasukkan pada Psim merupakan VFD untuk motor yang berkapsitas besar. Data yang dimasukkan ke Psim berupa karakteristik nilai *magnitude* dari VFD tersebut. Setelah itu dilakukan running program dan didapat nilai *magnitude* VFD hasil proses *filtering*. Kemudian hasil berupa *magnitude* tersebut dikonversikan kembali kedalam bentuk VFD baru pada ETAP. VFD baru tersebut merupakan VFD yang telah diberi filter aktif. Selanjutnya dilakukan *running* harmonisa kembali pada ETAP dan didapatkan hasil dari penggunaan kombinasi filter pasif dan aktif atau biasa disebut filter *hybrid*. Untuk lebih jelasnya terkait pemodelan rangkaian filter aktif, proses memasukkan serta menkonversi VFD dan hasil yang diperoleh akan dijelaskan pada sub bab berikut ini.

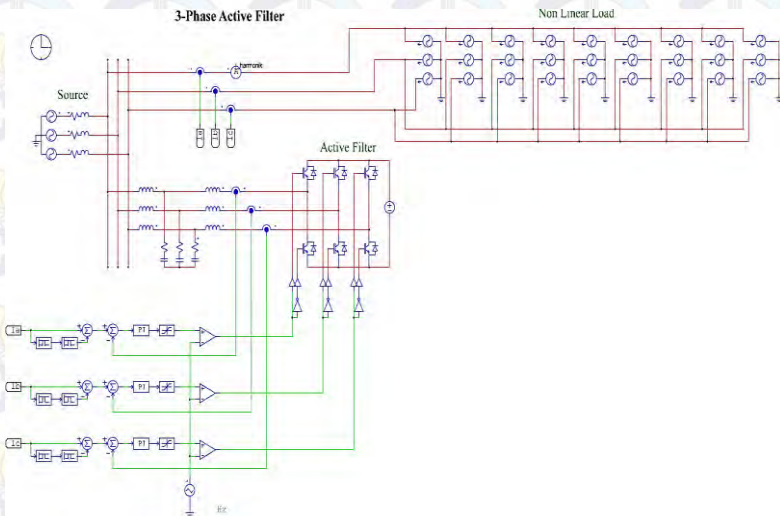
4.4.1 Rangkaian Filter Aktif pada Psim

Berikut adalah pemodelan filter aktif yang ada pada Psim, dengan beban non linier dan penggunaan parameter sebagai berikut :

Tabel 4.31 Data Beban Non Linier (kiri) dan Parameter Filter Aktif (kanan)

Data Beban Non linier		Parameter Filter Aktif	
Orde	Nilai	Elemen	Parameter
5	42%	V _{dc}	1000 V
7	14.3%	L ₁	0.002 H
11	7.9%	L ₂	0,0005 H
13	3.2%	R	0.1 Ω
17	3.7%	C	2 μ F
19	2.3%	K _P	10
23	2.3%	K _C	5
25	1.4%	F _c	10020 Hz

Berikut adalah gambar rangkaian simulasi filter aktif yang dimodelkan pada *software* Psim :



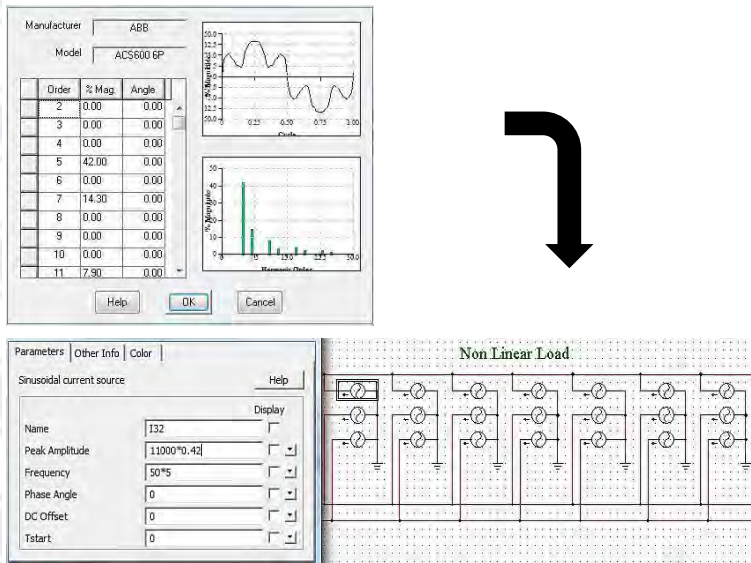
Gambar 4.51 Pemodelan Rangkaian Filter Aktif pada Psim

4.4.2 Simulasi dan Pemasangan Filter Aktif

Pada tugas akhir ini, simulasi dan pemasangan filter aktif menggunakan Psim dan ETAP. Untuk melakukan simulasi pada Psim, terlebih dahulu dilakukan pengambilan data karakteristik VFD pada *plant* Pakistan Deep Water Containeer Port yang terdapat didalam ETAP. Berikut akan dijelaskan mulai dari simulasi hingga hasil yang diperoleh.

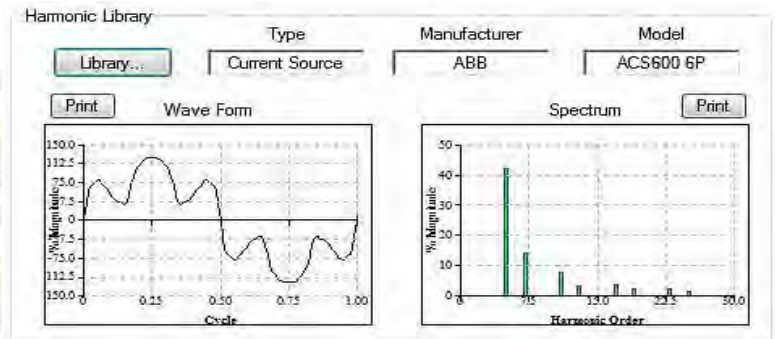
4.4.2.1 Konversi Data Karakteristik VFD dari ETAP ke Psim

Mekanisme pengambilan data karakteristik VFD dari ETAP adalah dengan mengambil data *magnitude* dari VFD tersebut kemudian memasukkan kedalam sumber harmonik yang terdapat pada rangkaian filter aktif pada Psim. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar di bawah ini :

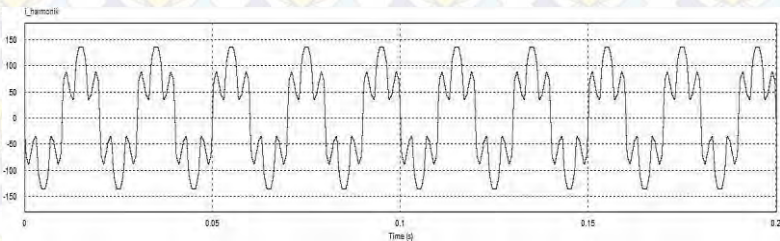


Gambar 4.52 Konversi Data Karakteristik VFD dari ETAP ke Psim

Nilai *magnitude* dari VFD dimasukkan ke dalam sumber harmonik (*Non Linier Load*) yang ada pada Psim sesuai dengan orde atau frekuensinya. Untuk memastikan bahwa data VFD yang dimasukkan ke dalam Psim sesuai dengan data yang terdapat pada ETAP maka dilakukan *running* bentuk gelombang sumber harmonik tersebut.



Gambar 4.53 Bentuk Gelombang dan Diagram Karakteristik VFD yang terdapat pada ETAP

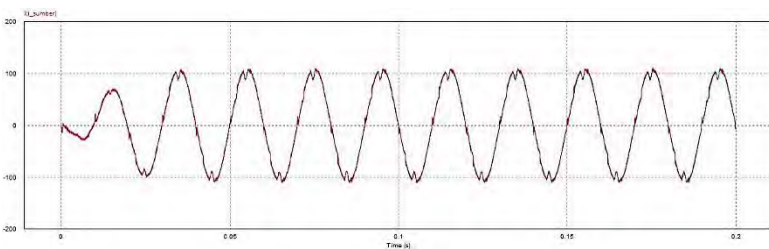


Gambar 4.54 Bentuk Gelombang Karakteristik VFD yang terdapat pada Psim

Pada gambar 4.53 dan 4.54 dapat disimpulkan bahwa bentuk gelombang yang terdapat pada ETAP dan Psim telah identik atau sama.

4.4.2.2 Hasil Simulasi Filter Aktif pada Psim

Bentuk gelombang hasil proses *filtering* adalah sebagai berikut :



Gambar 4.55 Bentuk Gelombang Setelah *Running* Simulasi

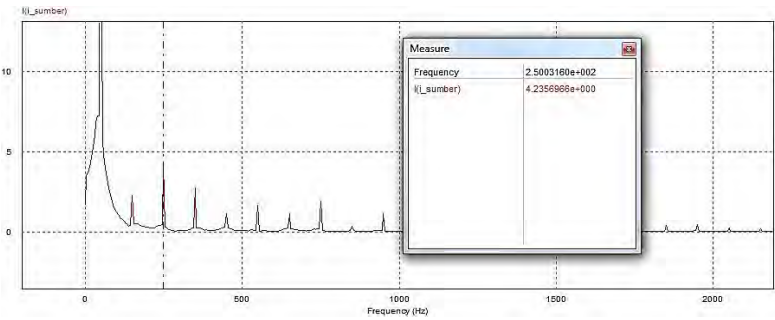
Tabel 4.32 Hasil Persentase Harmonisa Sebelum dan Setelah Simulasi Filter Aktif

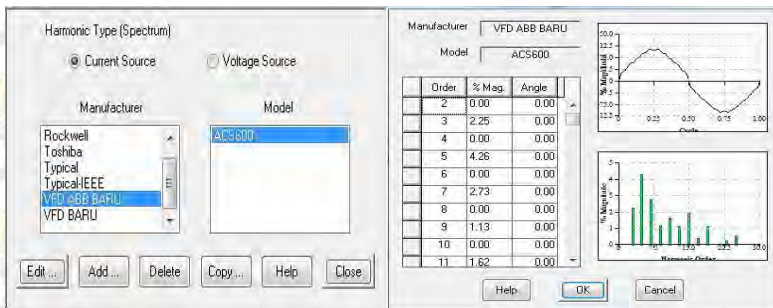
Sebelum Simulasi		Setelah Simulasi	
Orde	Nilai	Orde	Nilai
5	42 %	5	4.26 %
7	14.3 %	7	2.73 %
11	7.9 %	11	1.62 %
13	3.2 %	13	1.12 %
17	3.7 %	17	0.36 %
19	2.3 %	19	1.11 %
23	2.3 %	23	0.22 %
25	1.4 %	25	0.55 %

Pada gambar 4.55 menunjukkan bahwa kinerja filter aktif telah mampu memperbaiki gelombang harmonisa. Pada tabel 4.32 hasil *magnitude* harmonisa setelah simulasi terjadi penurunan yang signifikan. *Magnitude* dari gelombang sumber inilah yang dimasukkan sebagai data karakteristik dalam bentuk VFD baru yang digunakan pada ETAP.

4.4.2.3 Konversi Data VFD Baru dari Psim ke ETAP

Untuk mendapatkan data *magnitude* VFD baru perlu dilakukan *running Fast Fourier Transform* (FFT) pada gelombang hasil simulasi filter aktif yang terdapat pada Psim. Kemudian didapatkan *magnitude* harmonisa sesuai dengan orde masing-masing. Setelah itu, nilai *magnitude* tersebut dikonversikan kedalam ETAP dalam bentuk VFD baru. VFD baru tersebut merupakan VFD yang telah diberikan filter aktif. Berikut adalah mekanisme konversi data VFD baru ke dalam ETAP.





Gambar 4.56 Konversi Data *Magnitude* VFD baru dari Psim ke ETAP

4.4.2.4 Hasil Simulasi Filter Hybrid pada ETAP

Setelah dikonversi dari Psim ke ETAP, VFD baru yang telah diberikan filter aktif tersebut dipasang pada motor yang memiliki kapasitas terbesar pada *network* SS-6 dan SS-7. Berikut ditampilkan data persentase harmonisa pada bus dan kabel setelah pemasangan filter *hybrid* pada *network* SS-6 dan SS-7.

Tabel 4.33 Persentase Harmonisa Terhadap Tegangan Fundamental pada Orde Tertentu Setelah Pemasangan Filter *Hybrid*

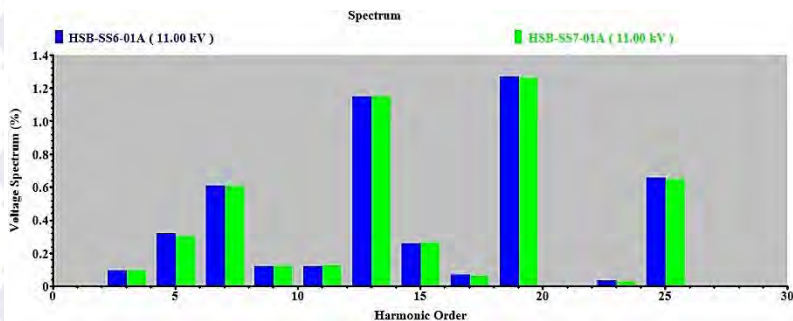
BUS ID	kV	THD _v (%)	ORDE (%)							
			5	7	11	13	17	19	23	25
HSB-SS6-01A	10.99	2.11	0.37	0.70	0.13	1.23	0.07	1.31	0.04	0.69
HSB-SS6-01B	10.99	2.11	0.37	0.70	0.13	1.23	0.07	1.31	0.04	0.69
HSB-SS7-01A	11	2.10	0.38	0.71	0.14	1.22	0.06	1.30	0.03	0.69
HSB-SS7-01B	11	2.10	0.38	0.71	0.14	1.22	0.06	1.30	0.03	0.69

Tabel 4.34 Persentase Harmonisa Terhadap Arus Fundamental pada Orde Tertentu Setelah Pemasangan Filter *Hybrid*

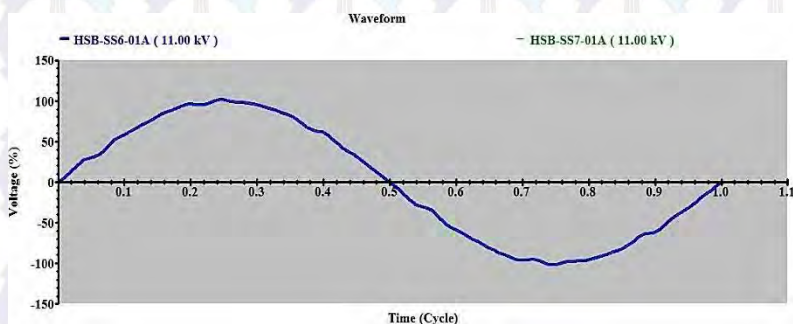
ID	Arus (A)	THD _i (%)	ORDE (%)							
			5	7	11	13	17	19	23	25
Cable 11	329.1	5.15	0.66	3.89	2.43	1.14	1.29	1.12	0.62	0.42
Cable 22	403.3	6.07	2.67	4.38	0.34	2.22	1.00	0.63	0.48	0.22

Hasil yang diperoleh berdasarkan tabel 4.33 dan 4.34 diatas menunjukkan terjadi penurunan nilai THDv dan THDi. Setelah dipasang filter *hybrid* kedalam sistem, nilai THDi yang sebelumnya melebihi standar yang ditentukan, sekarang memenuhi dari batas nilai yang ditentukan. Begitu juga dengan nilai individual harmonik tegangan dan arus, nilai pada semua orde juga telah memenuhi batas yang ditentukan. Sehingga dapat disimpulkan bahwa untuk meredeam semua distorsi harmonisa yang terdapat pada Proyek Pakistan Deep Water Container Port dibutuhkan pemasangan filter *hybrid* pada plant tersebut.

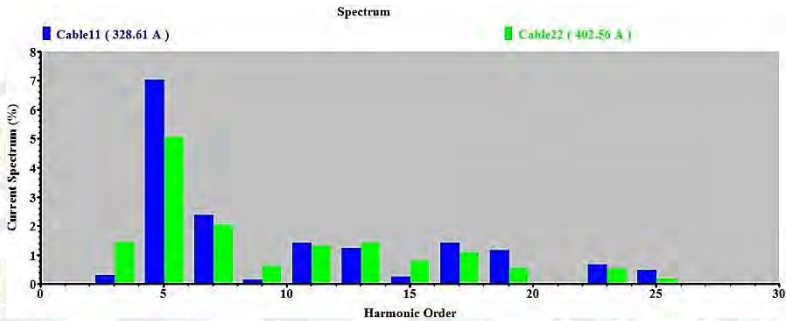
Untuk memperjelas hasil kinerja dari filter *hybrid* pada sistem, berikut ditampilkan gambar diagram dan gelombang tegangan beserta arus hasil proses *filtering* pada network SS-6 dan SS-7.



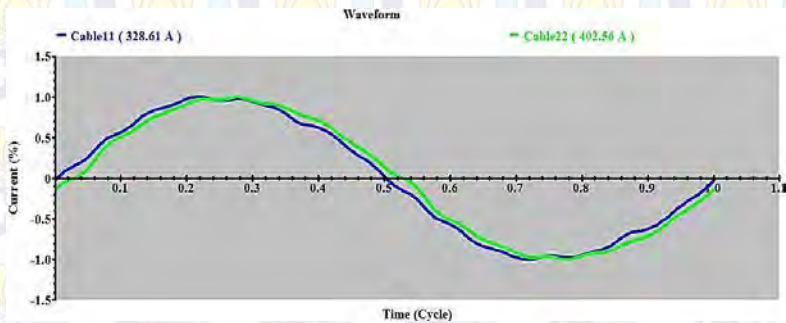
Gambar 4.57 Diagram Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter *Hybrid*



Gambar 4.58 Gelombang Tegangan pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter *Hybrid*



Gambar 4.59 Diagram Arus pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter *Hybrid*



Gambar 4.60 Gelombang Arus pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A Setelah Pemasangan Filter *Hybrid*

Hasil bentuk diagram dan gelombang tegangan serta arus setelah pemasangan filter *hybrid* ini menunjukkan penurunan distorsi harmonisa hingga memenuhi standar yang ditentukan. Bentuk gelombang tegangan karena pemasangan filter *hybrid* telah berbentuk sinusoidal yang semakin *smooth* (halus). Begitu juga dengan gelombang arus, sebelum dipasang filter *hybrid* gelombang tersebut masih terdapat *ripple*. Setelah pemasangan filter *hybrid*, *ripple* tersebut mengalami penurunan yang cukup signifikan. Bentuk gelombang arus menjadi berbentuk sinusoidal. Sehingga dapat disimpulkan pemasangan filter *hybrid* mampu memperbaiki bentuk gelombang tegangan maupun arus pada sistem yang awalnya terdapat *ripple* menjadi bentuk sinusoidal.

4.5 Perbandingan Setelah Pemasangan Filter *Hybrid*

Berikut adalah perbandingan antara menggunakan filter pasif dengan filter *hybrid*.

Tabel 4.35 Perbandingan antara menggunakan filter pasif dan filter *Hybrid*

Bus ID	Isc/I _L	THD _v		THDi	
		Filter Pasif	Filter <i>Hybrid</i>	Filter Pasif	Filter <i>Hybrid</i>
HSB-SS6-01A	63.4	2.45	2.11	8.16	5.15
HSB-SS6-01B	63.4	2.45	2.11	8.16	5.15
HSB-SS7-01A	38.43	2.45	2.10	8.92	6.07
HSB-SS7-01B	38.43	2.45	2.10	8.92	6.07

Berikut adalah hasil simulasi harmonisa pada sistem kelistrikan setelah ditambahkan filter *hybrid*.

Tabel 4.36 Data Hasil Simulasi Aliran Daya pada Bus Generator Setelah Pemasangan Filter *Hybrid*

ID BUS	kV	kW	kVAR	kVA	%pf
Bus 2	11	5887	748	5934	99.2
Bus 3	11	7500	3000	8078	92.8
Bus 4	11	7500	2000	7761	96.6
Bus 5	11	1000	500	1118	89.4
Bus 31	11	1000	500	1118	89.4

Tabel 4.37 Data Hasil Simulasi Aliran Daya pada Bus Penyulang Utama (*Main Bus*) Setelah Pemasangan Filter *Hybrid*

ID BUS	kV	kW	kVAR	kVA	%pf
MV-CP-004A	11	21492	5665	22227	96.7
Bus 13	11	1392	1081	1762	79.0
Bus 14	0.4	1368	907	1641	83.3

Tabel 4.38 Data Hasil Simulasi Aliran Daya pada *Network* SS-6 dan SS-7 (Bus Harmonisa) Setelah pemasangan filter *Hybrid*

ID BUS	kV	kW	kVAR	kVA	%pf
HSB-SS6-01A	11	6259	113	6260	100.0
HSB-SS7-01A	11	7602	1005	7668	99.1

Berikut adalah hasil simulasi harmonisa pada sistem kelistrikan setelah ditambahkan filter *hybrid*.

Tabel 4.39 Data Hasil Simulasi Harmonisa Setelah Pemasangan Filter *Hybrid*

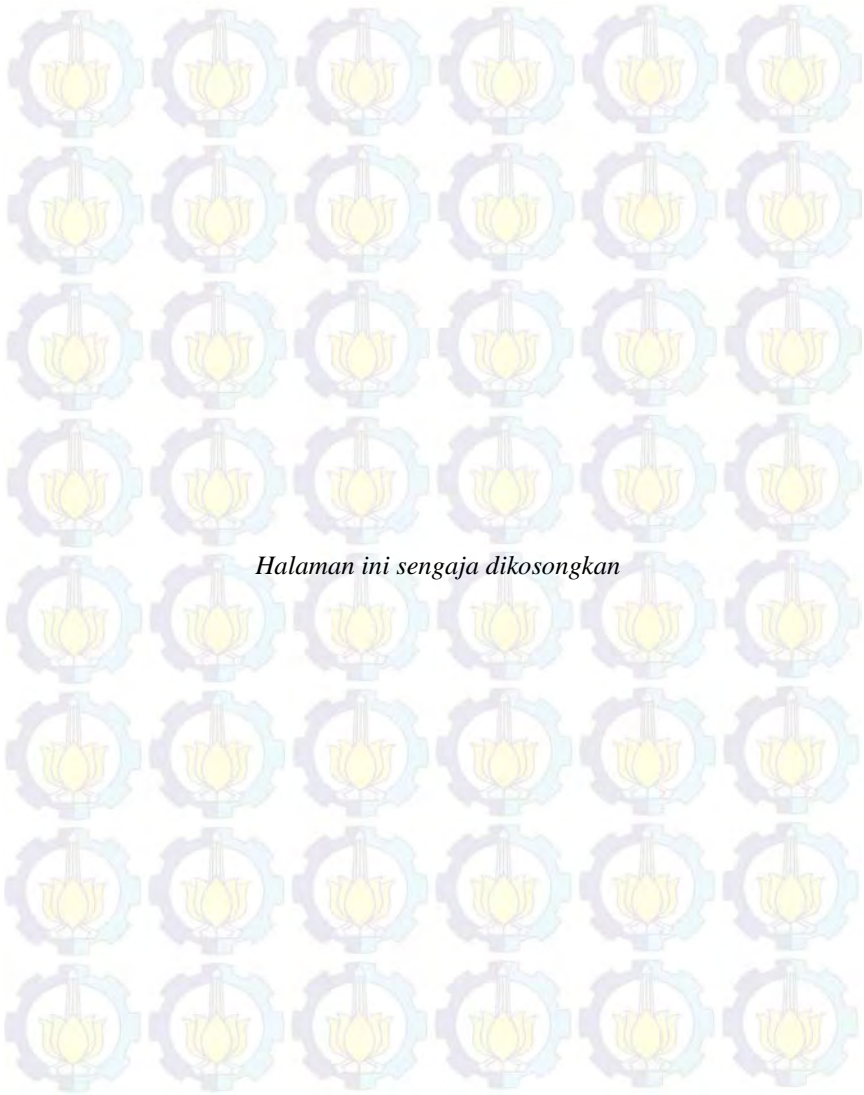
From Bus ID	To Bus ID	Nominal kV	THDi %	THDv %
Bus1	HSB-SS2-01B	11	0.85	1.95
Bus2	Bus9	11	1.40	1.97
Bus3	Bus10	11	1.41	1.97
Bus4	Bus11	11	1.46	1.97
Bus5	Bus12	11	1.65	1.97
Bus6	HSB-SS2-01B	11	1.91	1.97
Bus9	MV-CP-004A	11	1.39	1.97
Bus10	MV-CP-004A	11	1.02	1.97
Bus11	MV-CP-004A	11	1.06	1.97
Bus12	MV-CP-004A	11	1.53	1.97
Bus13	Bus14	11	0.57	1.97
Bus14	Bus92	0.4	0.60	1.18
Bus15	MCC-CP-006 BUS C	0.4	0.00	1.17
Bus16	MV-CP-004B	11	0.00	1.17
Bus19	Bus72	11	1.91	1.95
Bus21	Bus74	11	1.91	1.95
Bus22	HSB-SS1-01A	0.4	1.03	1.27
Bus23	HSB-SS1-01B	0.4	1.03	1.27
Bus25	Bus71	11	1.74	1.95
Bus26	Bus75	11	1.43	1.95
Bus28	MV-CP-004A	11	1.53	1.97
Bus31	Bus28	11	1.65	1.97
Bus33	HSB-SS6-01A	11	6.74	2.01
Bus34	HSB-SS6-01A	11	3.79	2.04
Bus35	HSB-SS6-01B	11	3.79	2.04
Bus36	HSB-SS6-01B	11	3.79	2.04
Bus37	HSB-SS6-01B	11	3.79	2.04
Bus38	HSB-SS6-01B	11	3.79	2.04
Bus39	HSB-SS6-01B	0.4	1.04	1.28

Tabel 4.39 Data Hasil Simulasi Harmonisa Setelah Pemasangan Filter *Hybrid* (Lanjutan)

From Bus ID	To Bus ID	Nominal kV	THDi %	THDv %
Bus40	HSB-SS2-01A	11	1.43	1.95
Bus41	Bus97	11	1.43	1.95
Bus43	HSB-SS5-01	0.4	1.23	1.61
Bus44	HSB-SS7-01A	11	6.73	2.03
Bus47	HSB-SS7-01A	11	6.74	1.98
Bus49	HSB-SS7-01A	11	3.59	2.03
Bus54	HSB-SS7-01B	0.4	1.03	1.27
Bus55	HSB-SS2-01A	11	1.43	1.95
Bus56	HSB-SS7-01A	11	3.59	2.03
Bus61	HSB-SS7-01B	11	3.59	2.02
Bus62	HSB-SS7-01B	11	3.59	2.02
Bus63	HSB-SS7-01B	11	6.74	2.00
Bus64	HSB-SS7-01B	11	6.74	2.00
Bus67	Bus1	0.4	0.88	1.07
Bus68	Bus55	0.4	1.43	1.26
Bus69	Bus40	0.4	1.43	1.26
Bus71	Bus25	0.4	1.74	1.50
Bus72	Bus19	0.4	1.91	1.64
Bus73	Bus6	0.4	1.91	1.64
Bus74	Bus21	0.4	1.91	1.64
Bus75	Bus26	0.4	1.43	1.26
Bus79	HSB-SS5-01	11	3.80	2.01
Bus80	HSB-SS5-01	0.4	1.24	1.58
Bus81	HSB-SS4-01	11	1.25	2.02
Bus83	HSB-SS27-01	11	3.31	2.01
Bus87	MCC-CP-006B	0.4	0.00	1.17
Bus90	HSB-SS6-01A	11	3.79	2.04
Bus91	HSB-SS6-01A	11	3.79	2.04
Bus92	MCC-CP-006A	0.4	0.60	1.17
Bus97	Bus41	0.4	1.43	1.26
HSB-SS1-01A	MV-CP-004A	11	1.49	1.97
HSB-SS1-01B	HSB-SS2-02B	11	3.59	1.97

Tabel 4.39 Data Hasil Simulasi Harmonisa Setelah Pemasangan Filter *Hybrid* (Lanjutan)

From Bus ID	To Bus ID	Nominal kV	THDi %	THDv %
HSB-SS2-01A	HSB-SS1-01A	11	1.43	1.95
HSB-SS2-01B	HSB-SS1-02	11	1.43	1.95
HSB-SS2-02A	HSB-SS1-01A	11	0	1.97
HSB-SS2-02B	HSB-SS1-01B	11	0	1.97
HSB-SS3-01	HSB-SS1-02	11	5.16	2.00
HSB-SS4-01	Bus81	11	2.40	2.02
HSB-SS5-01	HSB-SS1-01A	11	7.92	1.98
HSB-SS6-01A	HSB-SS1-01A	11	1.04	1.99
HSB-SS6-01B	HSB-SS6-01A	11	3.79	1.99
HSB-SS7-01A	HSB-SS1-01A	11	6.21	1.98
HSB-SS7-01B	HSB-SS7-01A	11	1.03	1.98
MCC-1P-007	MCC-CP-006A	0.4	0.42	1.16
MCC-2CP-007 (ENGINE-2).	MCC-CP-006A	0.4	0.41	1.16
MCC-3CP-007 (ENGINE-3).	MCC-CP-006A	0.4	0.41	1.16
MCC-CP-006A	MCC-1P-007	0.4	0.42	1.17
MCC-CP-006B	MCC-CP-006A	0.4	2.13	1.17
MCC-CP-006C	MCC-CP-006B	0.4	0.80	1.17
MCC-CP-008	MCC-CP-006A	0.4	0.47	1.17
MV-CP-004A	HSB-SS1-01A	11	0.57	1.97
MV-CP-004B	Bus16	11	0	1.17
Cable61~	MCC-CP-006 BUS C	0.4	0	1.17
Cable62~	MCC-CP-006 BUS C	0.4	0	1.17
Cable63~	MCC-CP-006 BUS C	0.4	0	1.17
Cable12~	HSB-SS1-01B	11	0	1.97
Cable23~	HSB-SS1-01B	11	0	1.97



BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Setelah dilakukan proses simulasi dan analisis pemasangan filter *hybrid* pada Proyek Pakistan Deep Water Containeer Port maka selama proses tersebut penulis dapat mengambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Penempatan pemasangan filter *hybrid* telah sesuai, yaitu pada bus yang terdapat didalam *Network* SS-6 dan SS-7. Bus-bus tersebut merupakan sumber utama harmonisa pada *plant* tersebut. Sehingga setelah pemasangan filter, didapatkan hasil yang maksimal dalam peredaman harmonisa dan sesuai dengan standar IEEE 519-1992.
2. Perhitungan spesifikasi filter telah sesuai, hal tersebut dapat dibuktikan bahwa sebelum dipasang filter nilai $THD_v = 20.74\%$ dan $THD_i = 46.88\%$ pada *network* SS-6 sedangkan pada *Network* SS-7 nilai $THD_v = 20.66$ dan $THD_i = 45.11$. Setelah dilakukan perhitungan dan pemasangan filter *hybrid*, nilai harmonik tersebut turun menjadi $THD_v = 1.99\%$ dan $THD_i = 7.93\%$ pada *Network* SS-6. Sedangkan pada *Network* SS-7 nilai $THD_v = 1.98\%$ dan $THD_i = 6.22\%$. Selain itu, pemasangan filter juga mampu meningkatkan nilai *Power Factor* dari 93.7% menjadi 100% serta dari 92.1 menjadi 99.1% (pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A).
3. Pemasangan filter pada *Network* SS-6 hanya mampu untuk menurunkan harmonisa tegangan (THD_v) saja. Sehingga perlu pemasangan filter pada *Network* SS-7 untuk menurunkan nilai harmonisa arus (THD_i).
4. Pemasangan filter *hybrid* perlu dilakukan pada *plant* tersebut, karena dengan pemasangan filter pasif saja belum mampu untuk menurunkan nilai harmonisa arus (THD_i) pada *Network* SS-7 sesuai dengan standar IEEE 519-1992.
5. Filter *hybrid* yang dipasang pada *plant* ini berupa filter pasif yang kinerjanya dikombinasikan dengan filter aktif. Simulasi pemasangan filter aktif di *plant* ini dikonversikan dalam bentuk VFD baru dan dipasang pada motor dengan kapasitas terbesar.

5.2 Saran

Dalam usaha untuk menyelesaikan tugas akhir ini, saran yang dapat diberikan untuk kedepannya antara lain :

1. Untuk mengatasi harmonisa yang terjadi pada Proyek Pakistan Deep Water Containeer Port, pemasangan filter *hybrid* pada tugas akhir ini dapat digunakan sebagai referensi dan pertimbangan bagi perusahaan yang bersangkutan.
2. Berdasarkan hasil simulasi, tingkat peredaman harmonisa akan lebih maksimal apabila filter aktif dipasang pada semua VFD yang ada pada plant tersebut. Namun dengan alasan untuk mencari nilai yang ekonomis maka filter aktif dipasang hanya pada VFD pada motor terbesar saja. Oleh karena itu perlu dilakukan studi lebih lanjut terkait hal tersebut.
3. Tugas akhir ini dapat digunakan sebagai referensi maupun pembanding oleh mahasiswa atau peneliti untuk melakukan studi dalam hal yang berkaitan dengan filter harmonisa maupun filter *hybrid*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Stevenson W.D, “*Electrical Power System Analysis*”, Fourth Edition, McGraw-Hill, London, 1993.
- [2]. Roger C. Dugan, “*Electrical Power System Quality*”, McGraw-Hill, New York, 1996.
- [3]. Hutaaruk T.S, “*Analisa Sistem Tenaga Listrik*”, Jilid I, Bandung, 1992.
- [4]. Margo Pujiantara, “*Penyempurnaan Desain Filter Harmonisa Menggunakan Kapasitor Eksisting Pada Pabrik Soda Kaustik di Serang-Banten*”, JAVA Journal of Electrical and Electronics Engineering, Vol. 1, No. 2, Oct 2003, ISSN 1412-8306.
- [5]. IEEE, “*Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*”, 1987. IEEE Std.519-1992
- [6]. Arrillaga.J, N.R. Watson. “*Power System Harmonics*”, Second Edition John Wiley & Sons Inc, 2003.
- [7]. Akagi H., “*Modern active filters and traditional passive filters*”, Bulletin of the polish academy of sciences technical sciences, vol.54, no.3, 2006.
- [8]. Angelo Baghini, “*Handbook of Power Quality*“, John Wiley & Sons, Inc, 2008.
- [9]. Ahmed M. Mohammed., “*Analysis and Simulation of Shunt Active Filter for Harmonic Cancellation of Non Linear Loads*”. Engineer & Technology Journal Vol.28 No.16, 2010.
- [10].Jonathan Herson Ruben, Rony Seto Wibowo, dan Ontoseno Penangsang, “*Analisis Unjuk Kerja Filter Pasif dan Filter Aktif pada Sisi Tegangan Rendah di Perusahaan Semen Tuban, Jawa Timur*”, JURNAL TEKNIK POMITS Vol. 1, No. 1, 2012.

BIODATA PENULIS



Rahman Efandi, dilahirkan di Kota Surabaya, Jawa Timur pada 7 Juni 1992. Penulis memulai jenjang pendidikan di SDN Rangkah 8 Surabaya, SMPN 1 Surabaya, dan SMAN 2 Surabaya hingga lulus pada tahun 2011. Pada tahun itu pula penulis melanjutkan pendidikan ke jenjang perguruan tinggi di Teknik Elektro Institut Teknologi Sepuluh Nopember melalui jalur SNMPTN. Selama kuliah, penulis aktif sebagai staf di Departemen Kewirausahaan HIMATEKTRO 2012-2013. Penulis juga pernah aktif dalam kegiatan kepanitiaan seperti LCEN 2013 dan LCEN 2014. Selain kegiatan organisasi, penulis juga aktif bidang keilmiah. Penulis dapat dihubungi melalui email efandi.rahman11@mhs.ee.its.ac.id.